

# UNIVERSIDAD DE CUENCA



## FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

### “CARACTERIZACIÓN DE LA ISLA DE CALOR URBANA SUPERFICIAL EN LA CIUDAD DE CUENCA MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES”

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO  
A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO AMBIENTAL

**AUTOR:**

HERMEL DANIEL ÁLVAREZ PUCHA

C.I: 0707171625

hermel.alvarez@ucuenca.edu.ec

**DIRECTOR:**

BLGO. JULIO DANILO MEJÍA CORONEL, MSc

C.I: 0103638581

CUENCA – ECUADOR

2 de junio de 2020



HOJA EN BLANCO



---

## Resumen

La expansión y el desarrollo urbano no controlado han alterado en gran medida la estructura de la cobertura de suelo a escala mundial. El cambio drástico del uso de suelo repercute en efectos secundarios importantes en los procesos de equilibrio energético en la superficie de la tierra. Así, las tasas crecientes de superficies impermeables han dado lugar a patrones anormales en la temperatura de la superficie terrestre (LST). Las áreas con una tasa de urbanización relativamente alta, como las ciudades densamente pobladas, probablemente serán más vulnerables a los impactos no deseados del LST. El carácter atractivo de las ciudades desarrolladas debido a la comodidad de vida potencialmente alta en términos de transporte, recreación e industrialización es el principal factor que desencadena las fluctuaciones en los valores de LST. La formación de islas de calor urbano superficial (SUHI) está estrechamente relacionada con los patrones LST y con la estructura de uso de suelo. Es importante tener presente que las islas de calor urbano es uno de los impactos más comunes derivado del proceso de urbanización. La expansión no planificada sobre todo de superficies impermeables puede aumentar potencialmente la posibilidad de que se suscite el fenómeno SUHI. La tecnología de teledetección es una herramienta valiosa para la determinación y cuantificación del efecto SUHI en un área determinada. En este estudio se investiga la evaluación temporal del efecto SUHI en la ciudad de Cuenca. El estudio tiene como objetivo investigar la isla de calor urbana superficial en función de la temperatura de la superficie terrestre estimada a partir de la banda 10 del sensor infrarrojo térmico (TIRS) del satélite Landsat-8 para el periodo comprendido entre 2013-2017. Los resultados confirman la existencia de un efecto SUHI en la ciudad, con intensidades variables dentro de emplazamientos específicos; las parroquias El Sagrario, Cañaribamba, San Blas, Gil Ramírez, Totoracocha y Sucre son las principales áreas que están siendo perjudicadas por los efectos de las islas de calor. Tales parroquias poseen superficies con la presencia de SUHI en más del 50% de su territorio y presentan valores de LST promedio que oscilan entre 34.28 y 35.97 °C. Adicionalmente, los resultados mostraron que los valores promedios de LST en el área urbana fueron al menos 3.83 a 4.87 °C más alto que en las áreas no desarrolladas. Además, la correlación positiva entre LST y NDBI mostró un efecto amplificador de la magnitud SUHI en los sectores desarrollados, mientras que las áreas con predominio de vegetación atenuaron el efecto SUHI. Por otra parte, los centros urbanos, agrupados en algunas partes de la ciudad, recibieron el peor índice de evaluación ecológica. Finalmente, es menester mencionar que la adopción de medidas para guiar la planificación urbana, es una alternativa necesaria para mitigar el efecto de las islas de calor y proporcionar confort térmico en las zonas urbanas, esto con el fin de garantizar la calidad de vida de la población de la ciudad de Cuenca.

**Palabras Claves:** Temperatura superficial terrestre; Índices vegetación; Islas de calor urbano; UTFVI; Sensores remotos; urbanización.

## Abstract

Expansion and uncontrolled urban development have greatly altered the structure of land cover on a global scale. Drastic change of land use causes important secondary effects in the processes of energy balance on the Earth's surface. Consequently, increasing rates of impermeable surfaces have given place to abnormal patterns of land surface temperature (LST). Areas with relatively high urbanization rates, such as densely populated cities, will probably be more vulnerable to non-desirable impacts of LST. The attractive nature of developed cities, due to potentially high life comfort in terms of transportation, recreation and industrialization, is the main factor that triggers fluctuations in LST values. The formation of surface urban heat islands (SUHI) is closely related with LST patterns and with land use structure. It is important to keep in mind that surface urban heat islands is one of the most common impacts derived from the process of urbanization. The unplanned expansion, mostly of impermeable surfaces can potentially increase the possibility of SUHI phenomenon to happen. Remote sensing technology is a valuable resource for the determination and quantification of the SUHI effect in a determined area. In this study, temporal evaluation of SUHI effect in the city of Cuenca is investigated. The goal of this study is to investigate surface urban heat island as a function of land surface temperature estimated from band 10 of the thermal infrared sensor (TIRS) of Landsat-8 satellite, for the period between 2013 and 2017. The results confirm the existence of a SUHI effect in the city, with variable intensities within specific locations; El Sagrario, Cañaribamba, San Blas, Gil Ramírez, Totoracocha and Sucre are the main areas that are being negatively affected by the consequences of heat islands. These areas have surfaces with the presence of SUHI in more than 50% of their territory, and they present average values of LST, between 34.28 and 35.97 °C. Additionally, the results showed that the average values of LST in the urban area were at least 3.83 to 4.87 °C higher than in undeveloped areas. Also, the positive correlation between LST and NDBI showed an amplifying effect of SUHI magnitude in developed locations, while areas with vegetation predominance attenuated the SUHI effect. On the other hand, urban centers grouped in some parts of the city received the worst ecological evaluation index. Finally, it is indispensable to mention that the adoption of measures to guide urban planning is a necessary alternative to mitigate the effect of heat islands, and to provide thermal comfort in urban zones, thus guaranteeing the quality of life of Cuenca's population.

**Keywords:** Land Surface Temperature; Vegetation Indices; Urban heat island; UTFVI; Remote Sensing; urbanization.

---

## Índice de Contenido

Resumen.....	ii
Abstrac.....	iii
1. Introducción .....	1
2. Planteamiento y formulación del problema.....	3
3. Objetivos .....	4
3.1 Objetivo General .....	4
3.2 Objetivo Específico .....	4
4. Marco Teórico .....	5
4.1 Fenómeno isla de calor urbano (UHI).....	5
4.2 Tipos de isla de calor urbano.....	7
4.2.1 Isla de Calor Subsuperficial .....	7
4.2.2 Isla de Calor Superficial .....	7
4.2.3 Isla de Calor de la Capa de Dosel.....	8
4.2.4 Isla de Calor de la Capa límite .....	8
4.3 Causas de la isla de calor.....	9
4.3.1 Balance de energía .....	9
4.3.2 Reducción de la evaporación.....	10
4.3.3 Incremento en el almacenamiento de calor .....	11
4.3.4 Incremento de la radiación neta.....	11
4.3.5 Reducción de la convección .....	11
4.3.6 Incremento del calor antropogénico .....	12
4.4 Efectos de las islas de calor.....	12
4.4.1 Reducción en la salud y la comodidad humana.....	12
4.4.2 Incremento en el uso de energía .....	12
4.4.3 Emisiones elevadas de contaminantes atmosféricos y gases de efecto invernadero .....	12
4.4.4 Deterioro de la calidad de agua .....	13
4.4.5 Vida del pavimento .....	13
4.5 Mitigación de la isla de calor .....	13
4.6 Beneficios de la mitigación de la isla de calor .....	14
4.6.1 Reducción de temperaturas .....	14
4.6.2 Ahorros de energía .....	15
4.6.3 Mejoramiento en la calidad del aire .....	15
4.6.4 Comodidad y mejora de la salud .....	17
4.6.5 Reducción de escorrentía de aguas pluviales .....	17
4.6.6 Mantenimiento y reducción de residuos.....	18
4.6.7 Beneficios de calidad de vida.....	18



4.7	Medición de la isla de calor.....	19
4.7.1	Estaciones fijas.....	19
4.7.2	Recorridos móviles.....	19
4.7.3	Sensores verticales .....	20
4.7.4	Balance de energía .....	20
4.7.5	Sensores remotos.....	20
4.8	Sensores remotos aplicados a la medición de la isla de calor .....	21
5.	Metodología .....	25
5.1	Generalidades .....	25
5.2	Área de estudio.....	25
5.3	Adquisición de imágenes satelitales.....	26
5.4	Procesamiento de imágenes satelitales.....	27
5.4.1	Corrección Geométrica .....	28
5.4.2	Corrección radiométrica absoluta.....	28
5.5	Análisis de datos.....	34
5.5.1	Análisis estadístico .....	34
5.5.2	Índice de evaluación ecológica.....	34
5.5.3	Caracterización del SUHI.....	35
5.5.4	Evaluación del SUHI entre el área urbana y la zona de expansión .....	35
5.6	Validación de la temperatura superficial terrestre.....	36
6.	Resultados .....	37
6.1	Cálculo de las variables de estudio.....	37
6.1.1	Cálculo de la Temperatura Superficial Terrestre (LST).....	37
6.1.2	Cálculo del NDVI.....	37
6.1.3	Cálculo del SAVI .....	38
6.1.4	Cálculo del NDBI.....	39
6.2	Índice de evaluación Ecológica.....	41
6.3	Distribución espacial y temporal de LST .....	42
6.4	Caracterización de SUHI en la ciudad de Cuenca.....	45
6.5	Análisis de Correlación entre LST y las variables biofísicas .....	47
6.6	Evaluación del SUHI entre el área urbana y la zona de expansión .....	49
6.7	Validación de los datos de LST.....	51
7.	Discusión.....	52
7.1	Índices de vegetación .....	52
7.2	Índice de evaluación ecológica.....	52
7.3	Distribución espacial y temporal de LST .....	53
7.4	Caracterización y evaluación de SUHI .....	53

7.5	Análisis de Correlación .....	54
7.6	Validación de datos .....	54
8.	Conclusiones .....	55
9.	Limitaciones del estudio.....	57
10.	Recomendaciones para estudios futuros.....	57
11.	Referencias .....	58
12.	Apéndices .....	68

## Índice de Ilustraciones

Ilustración 1.	Bosquejo de la isla de calor .....	5
Ilustración 2.	Tipos de islas de calor .....	7
Ilustración 3.	Rango de temperatura de diferentes materiales superficiales.....	15
Ilustración 4.	Reducción de emisiones de carbono en cinco ciudad de Estados Unidos.....	16
Ilustración 5.	Mapa de ubicación del área de estudio.....	26
Ilustración 6.	Flujo de trabajo para el procesamiento de las imágenes satelitales.....	27
Ilustración 7.	NDVI 2013-2017 .....	38
Ilustración 8.	SAVI 2013-2017 .....	39
Ilustración 9.	NDBI-2013-2017 .....	40
Ilustración 10.	UTFVI-2013-2017 .....	41
Ilustración 11.	LST-2013-2017 .....	43
Ilustración 12.	Perfiles de LST a lo largo del área de estudio 2013-2017.....	44
Ilustración 13.	Caracterización de UHI en la ciudad de Cuenca y su área de expansión.....	45
Ilustración 14.	Distribución de UHI en las parroquias urbanas de Cuenca.....	46
Ilustración 15.	Diagrama de cajas para LST .....	47
Ilustración 16.	Diagrama de dispersión para las variables del año 2017.....	48
Ilustración 17.	Zonas de evaluación para el análisis del efecto SUHI .....	49
Ilustración 18.	Intensidad SUHI 2013-2017.....	50
Ilustración 19.	Comparación entre LST derivado de MODIS y el Modelo propuesto por M. Wang et al. (2016) .....	51

## Índice de Tablas

Tabla 1.	Características importantes para la formación de islas de calor.....	9
Tabla 2.	Estimación de desechos de pavimentos, techos producidos y reciclados anualmente en EE.UU. ....	18
Tabla 3.	Información sobre las imágenes adquiridas .....	27
Tabla 4.	Fuerza de correlación .....	34
Tabla 5.	Valores umbrales para el índice de evaluación ecológico.....	35
Tabla 6.	Valores máximos, mínimos y promedios de LST .....	37
Tabla 7.	Valores máximos, mínimos y promedios de NDVI .....	37

---

Tabla 8. Valores máximos, mínimos y promedios de SAVI.....	38
Tabla 9. Valores máximos, mínimos y promedios de NDBI .....	39
Tabla 10. Caracterización de LST promedio en las parroquias urbanas de la ciudad de Cuenca .....	42
Tabla 11. Caracterización de LST promedio en las parroquias rurales de Cuenca .....	44
Tabla 12. Presencia de SUHI en la ciudad de Cuenca .....	46
Tabla 13. Correlación de Pearson entre LST y las variables físicas .....	48
Tabla 14. Intensidad de SUHI entre el área urbana y rural .....	49

## Apéndices

### Apéndice 1: Información Cartográfica

- Apéndice 1.1: Área de estudio
- Apéndice 1.2: Variables de estudio
- Apéndice 1.3: Corte longitudinal
- Apéndice 1.4: Puntos de muestreo
- Apéndice 1.5: LST de MODIS
- Apéndice 1.6: Puntos de Validación
- Apéndice 1.7: Caracterización UHI
- Apéndice 1.8: Índice UTFVI
- Apéndice 1.9: Zonas de evaluación UHI

### Apéndice 2: Análisis Estadístico

- Apéndice 2.1: Diagramas de cajas
- Apéndice 2.2: Diagramas de dispersión
- Apéndice 2.3: Tabla de puntos de validación



### **Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional**

Yo, Hermel Daniel Álvarez Pucha, en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación “CARACTERIZACIÓN DE LA ISLA DE CALOR URBANA SUPERFICIAL EN LA CIUDAD DE CUENCA MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES”, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 2 de junio de 2020

Hermel Daniel Álvarez Pucha

C.I: 0707171625





### Cláusula de Propiedad Intelectual

Yo, Hermel Daniel Álvarez Pucha, autor del trabajo de titulación “CARACTERIZACIÓN DE LA ISLA DE CALOR URBANA SUPERFICIAL EN LA CIUDAD DE CUENCA MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 2 de junio de 2020

Hermel Daniel Álvarez Pucha

C.I: 0707171625



## Agradecimiento

*A Dios, por darme salud, sabiduría y la mejor familia.*

*A mis padres, Oswaldo y Mirta, por todo el esfuerzo y sacrificio realizado durante mi trayecto universitario, por enseñarme que con trabajo y dedicación se pueden alcanzar todas las metas propuestas y sobre todo, por ser los mejores padres del mundo.*

*A mis hermanos, Cristian, Marcelo, Diego y Karen por todo el apoyo brindado cada día y sobre todo, por hacer mi vida mucho más divertida.*

*A mi amigo y director, el Blgo. Danilo Mejía, por instruirme en todo momento, por haber formado parte de mi crecimiento profesional, por haberme dado la oportunidad de ayudarlo en el ámbito universitario y por confiar en mí con esta investigación.*

*Finalmente, quiero agradecer a todos mis amigos y amigas, que aunque no los mencione saben perfectamente que forman parte de esta sección. Gracias por hacer que mi vida universitaria sea una de las más valiosas y entretenidas experiencia de vida.*



HOJA EN BLANCO

## 1. INTRODUCCIÓN

Es importante tener presente que la mayor parte de personas viven más en áreas urbanas que en rurales, con 55% de la población mundial residiendo en áreas urbanas en el año 2018 (United Nations, 2018). Adicionalmente, las Naciones Unidas (2018) proyecta que para el año 2050 el 68% de la población mundial pase a formar parte del sector urbano. El desarrollo de la sociedad y el acelerado proceso de urbanización pueden generar grandes impactos en el ambiente local, cambiando así, procesos de infiltración, escorrentía de aguas pluviales, precipitación, temperatura, calidad de aire, almacenamiento de carbono y la biodiversidad local; repercutiendo de forma directa en el medio ambiente (dos Santos et al., 2017).

En los últimos años se ha prestado mucha atención al desarrollo de las ciudades, principalmente porque enfrentan severos problemas ambientales y un reducimiento drástico en el área habitable, todo esto provocado por la excesiva tasa de crecimiento urbano. La rápida urbanización tiene como resultado un mayor reemplazo de tierras naturales por superficies construidas artificialmente, que pueden estar hechas de ladrillo, concreto, asfalto, piedras y otras superficies típicas de zonas urbanas que tienen la capacidad de capturar y almacenar grandes cantidades de calor, debido a sus propiedades termodinámicas (Yadav, Sharma, Peshin, & Masiwal, 2017).

Además, el calor liberado por vehículos, industrias, fábricas, etc., favorecen al incremento de la magnitud de las islas de calor (Ramakreshnan et al., 2018). El efecto isla de calor urbano (siglas en inglés UHI) funciona de la siguiente manera en las zonas urbanas: de la radiación neta que llega a la superficie de la tierra solo una pequeña porción de dicha energía evapora el agua, puesto que la mayor cantidad de esta se pierde en los sistemas de drenaje, o se escurren debido a los materiales impermeables; la mayor parte de la radiación caliente de forma directa la superficie del suelo y consecuentemente la del aire. No obstante, en las zonas rurales, la energía proporcionada por el proceso de radiación debe evaporar el agua que se encuentra en las coberturas vegetales, generando así, que la cantidad de energía que llega al suelo sea ínfima; provocando una variación de temperatura superficial entre la zona urbana y rural (Peres, Lucena, Rotunno Filho, & França, 2018). Es muy importante tener presente que el efecto isla de calor puede alterar la biodiversidad, el clima e incluso las condiciones del aire (Shen, Huang, Zhang, Wu, & Zeng, 2016), por lo tanto, puede influir de manera significativa en la calidad de vida y el bienestar humano en las áreas urbanas (Adeyeri, Akinsanola, & Ishola, 2017; Chen, Yang, Yin, & Chan, 2017; Meng et al., 2018; Ramakreshnan et al., 2018).

El efecto UHI puede ser evaluado de dos maneras: mediante mediciones de la temperatura del aire y a partir de mediciones satelitales (Shen et al., 2016). La medición de la temperatura del aire es un proceso muy engorroso, en especial en ciudades con grandes dimensiones, que se lo realiza a partir de comparaciones de temperatura en diferentes puntos a lo largo de la zona de estudio (Gu & Li, 2017). En general, las mediciones del efecto UHI considerando la temperatura del aire tienen una alta resolución con una amplia cobertura de tiempo, y mucho más importante, describe con efectividad la variación temporal del efecto UHI (Jandaghian, Touchaei, & Akbari, 2017), sin embargo; debido a la escasa distribución de estaciones meteorológicas, realizar un análisis espacial continuo a menudo es una tarea muy difícil. Para solucionar este problema, muchos estudios del efecto UHI se han basado en mediciones de la temperatura superficial terrestre (siglas en inglés LST) a partir de sensores remotos. El UHI calculado remotamente se lo denomina isla de calor urbano superficial (siglas en inglés SUHI) (Shi, Katzschner, & Ng, 2018). Una ventaja importante del uso de datos obtenidos por teledetección es la cobertura continua del área urbana, por tal razón, el cálculo del LST a partir de sensores remotos térmicos se ha convertido en una de las técnicas más comunes e importantes, usado como indicador en el análisis del efecto isla de calor (Hardin, Liu, Cao, & Vanos, 2017).

Existen numerosos estudios del efecto SUHI que han sido llevados a cabo usando datos de temperatura superficial a gran escala de satélites como NOAA, AVHRR y MODIS (Ferwati et al., 2017; Ramakreshnan et al., 2018; Soltani & Sharifi, 2017). Sin embargo, estos datos solo son adecuados para el mapeo de la temperatura superficial a una escala elevada, con una resolución espacial de aproximadamente 1 km. En la investigación realizada por Shen *et al.* (2016) se menciona que la

resolución espacial óptima, para calcular adecuadamente el SUHI a nivel local, debe ser de aproximadamente 100 m. Afortunadamente, varios sistemas satelitales pueden recuperar información termal con una resolución espacial relativamente fina. Por ejemplo, la resolución espacial de los sensores TM/ETM+/TIRS a bordo de los satélites Landsat 5, 7 y 8 respectivamente son de 60 m a 120 m (Mathew, Khandelwal, & Kaul, 2018). En los últimos años, la serie Landsat ha sido la principal fuente de datos para el análisis del efecto SUHI a escala fina, el único inconveniente existente, es que los satélites Landsat no proporcionan imágenes nocturnas.

Los datos exactos de las series de tiempo a estudiar son muy importantes para el monitoreo del crecimiento de SUHI (Bernard, Musy, Calmet, Bocher, & Keravec, 2017). Los datos obtenidos por teledetección a largo plazo pueden ayudarnos a comprender más intuitivamente el mecanismo de evolución del efecto SUHI, y su relación con el uso de suelo y el cambio climático; y por lo tanto, puede ayudar a los responsables de la toma de decisiones a desarrollar políticas acerca del uso del suelo (Deilami, Kamruzzaman, & Liu, 2018). Sin embargo, debido a la cobertura espacial limitada, la resolución temporal deficiente y la influencia de la nubosidad, a menudo es difícil obtener una secuencia de dato a largo plazo a una escala fina. Por ejemplo, los satélites Landsat tienen un ciclo de revisitas de 16 días; los efectos de las nubes, así como las brechas de rayas presentes en Landsat-7, pueden originar que no haya datos disponibles durante un periodo de varios meses.

La contradicción entre la oferta y demanda de datos satelitales es un problema muy común en la investigación del efecto SUHI (dos Santos et al., 2017; Ferwati et al., 2017; Hardin et al., 2017; Jandaghian et al., 2017). Como resultado de estos inconvenientes, la mayoría de trabajos enfocados en el efecto SUHI a largo plazo han tenido que usar solo unas pocas imágenes de detección remota (Shen et al., 2016).

## 2. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La climatología urbana se ocupa del estudio del efecto climático de las áreas urbanas y la aplicación de los conocimientos adquiridos para una mejor planificación y diseño de las ciudades. Se define principalmente por su enfoque en la ciudad e incorpora aspectos de muchas disciplinas, incluyendo meteorología, climatología, ciencia de la contaminación del aire, diseño urbano, biometeorología, entre otros. En este sentido, una de las manifestaciones más obvias de tal alteración climática son las islas de calor urbano (UHI), las cuales se caracterizan por presentar una marcada diferencia en la temperatura de la superficie en las áreas urbanas en comparación con su contraparte rural.

El UHI puede generar que se susciten emisiones elevadas de contaminantes atmosféricos y gases de efecto invernadero; aumentar las tendencias de consumo de energía; comprometer la salud y comodidad humana y deteriorar la calidad de agua. Todos estos impactos pueden verse exacerbados por el cambio climático y repercutir directamente en afecciones tanto al medio ambiente como a la población de una comunidad.

Caracterizar el UHI usando estaciones meteorológicas es insuficiente porque no se puede cubrir toda el área urbana de manera consistente. Por el contrario, la teledetección nos proporciona una imagen instantánea de toda la ciudad. De esta manera, el UHI puede definirse a nivel atmosférico o de la superficie. El UHI atmosférico depende de la posición de los sensores de la temperatura del aire: ya sea en el dosel urbano, es decir, utilizando la temperatura del aire medida entre la carretera y los techos, o en una capa límite, situada por encima de la capa anterior. El UHI de superficie (SUHI), por otro lado, se estudia utilizando datos de detección remota y el parámetro a estimar no es la temperatura del aire sino la temperatura de la superficie terrestre (LST).

En las últimas décadas, el uso de la teledetección junto con los sistemas de información geográficos ha establecido una sinergia de suma importancia para la elaboración de mapas temáticos que representan adecuadamente el estado térmico de una ciudad en específico. Adicionalmente, los datos obtenidos con dichas herramientas pueden ser contrastados con datos térmicos obtenidos a partir de estaciones meteorológicas.

En Ecuador el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) es la única entidad técnico - científica con la capacidad de generar y difundir información acerca del tiempo, clima e hidrología, mediante sus estaciones meteorológicas e hidrológicas activas y en funcionamiento. Así, el INAMHI se convierte en la única institución con una base de datos sólida para el estudio de las islas de calor urbano, así como también, como insumo de comparación de los resultados obtenidos a través de técnicas de teledetección. No obstante, en los boletines climáticos anuales que reporta dicha entidad no existe aún, información referente a las islas de calor en las diferentes ciudades del país.

La ciudad de Cuenca no es ajena a este efecto, y sin embargo, los estudios sobre el fenómeno isla de calor son escasos. El grado de industrialización que posee la ciudad junto con el aumento de la densidad poblacional, está generando que las condiciones ambientales junto con la calidad de vida presenten una tendencia descendente a largo plazo, situación importante que merece ser evaluada. A pesar de esta evidencia, hacen falta estudios que demuestren la importancia de la caracterización de las islas de calor urbano. La presente investigación intenta aportar al estudio de este fenómeno, mediante el cálculo de la temperatura superficial terrestre utilizando técnicas de percepción remota. Esta información puede ser útil para determinar zonas críticas que requieran intervenciones como techos verdes, corredores verdes, parques al interior de zonas urbanas, materiales de construcción sostenibles y pavimentos permeables e incluso para la creación de políticas de usos de suelo y toma correcta de decisiones; factores ambientales importantes que van a permitir asegurar la calidad de vida de la población urbana de la ciudad de Cuenca.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 *Objetivo General***

- Identificar y caracterizar el fenómeno isla de calor urbano superficial en la ciudad de Cuenca y su área de expansión, mediante el uso de imágenes térmicas del satélite Landsat-8 en el periodo de evaluación 2013-2017.

#### **3.2 *Objetivo Específico***

- Calcular la temperatura de la superficie terrestre a partir de la banda térmica número 10 del satélite Landsat-8 para el periodo 2013-2017.
- Calcular variables biofísicas (NDVI, SAVI, NDBI) a partir de las bandas visibles e infrarrojas del satélite Landsat-8 en los años de evaluación 2013-2017.
- Correlacionar la temperatura superficial terrestre con las variables biofísicas generadas para el área de estudio, para determinar la dependencia entre las variables analizadas.
- Identificar cuáles son las parroquias urbanas de la ciudad de Cuenca que se encuentran, en mayor proporción, sujetas al fenómeno isla de calor urbano.

## 4. MARCO TEÓRICO

### 4.1 Fenómeno isla de calor urbano (UHI)

Décadas de investigación han demostrado que las ciudades son casi siempre más cálidas que sus alrededores. Este fenómeno, conocido como isla de calor urbano (UHI), es uno de los ejemplos más claros de modificación inadvertida del clima debido a las actividades antropogénicas. El bosquejo de la isla de calor que se indica en la [Ilustración 1](#) muestra cómo las temperaturas urbanas son típicamente más bajas en la frontera urbano-rural que en las zonas densas del centro. El gráfico también muestra cómo los parques, terrenos abiertos y cuerpos de agua pueden crear áreas más frías dentro de una ciudad, evitando así la formación de islas de calor.

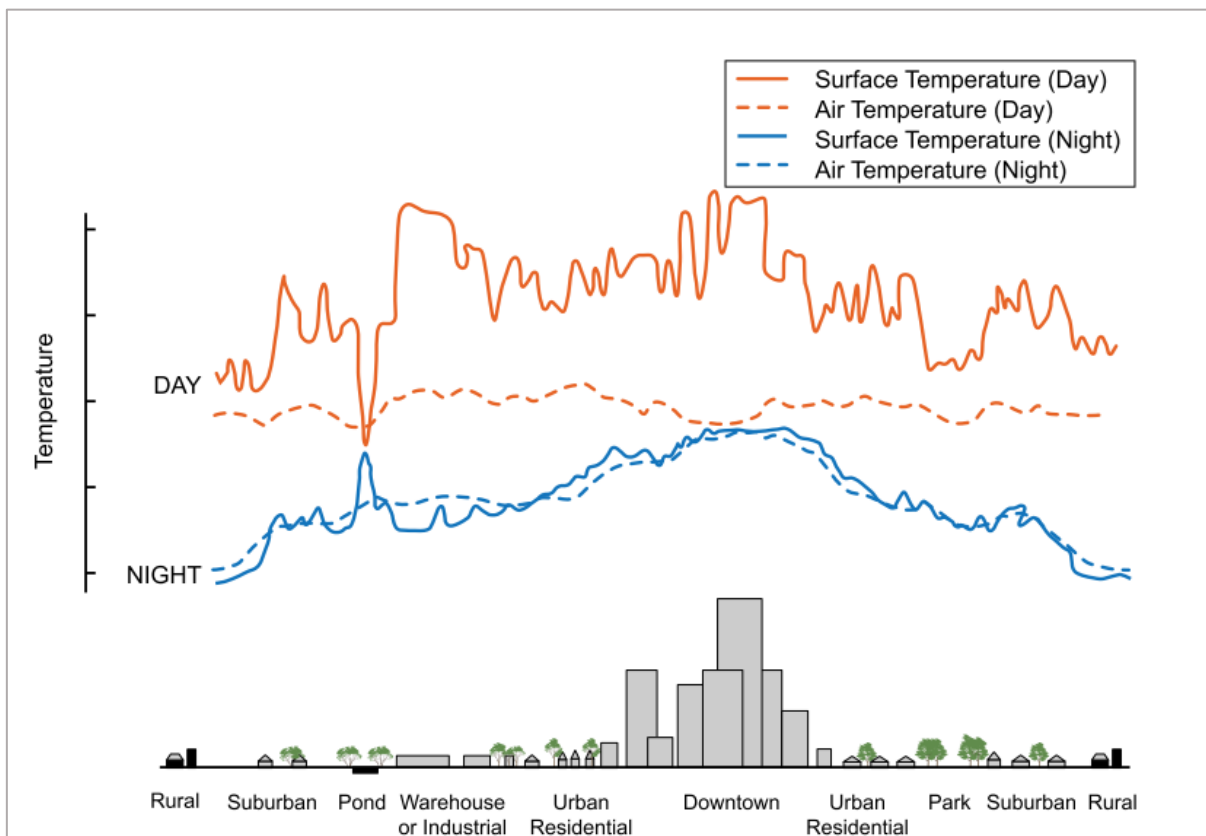


Ilustración 1. Bosquejo de la isla de calor

Fuente: (H. Li, 2015)

La primera documentación del calor urbano se remonta al año 1818 cuando el estudio pionero de Luke Howard<sup>1</sup> sobre el clima de Londres encontró un exceso artificial de calor en la ciudad en comparación con el país (Howard, 1833).

Las islas de calor se forman en áreas urbanas y suburbanas porque muchos materiales de construcción comunes absorben y retienen más calor del sol que los materiales naturales en áreas rurales menos desarrolladas. Hay dos razones principales para este calentamiento. Primero, la mayoría de los materiales de construcción urbanos son impermeables y herméticos, por lo que la humedad no está fácilmente disponible para disipar el calor del sol. En segundo lugar, los materiales oscuros recolectan y atrapan más energía solar. Las temperaturas de las superficies oscuras y secas al sol directo pueden alcanzar hasta 88 °C durante el día, mientras que las superficies con vegetación con suelo húmedo en las mismas condiciones pueden alcanzar solo 18 °C. El calor antropogénico o el calor producido por el

<sup>1</sup> Luke Howard (1772-1864) fue un Químico y Meteorólogo aficionado londinense. Fue el primer practicante serio de climatología urbana. Es famoso por su clasificación de nubes.

hombre, las velocidades bajas del viento y la contaminación del aire en las zonas urbanas contribuyen a la formación de islas de calor (Yao et al., 2018).

Es menester tener presente que durante el invierno, las islas de calor pueden ser beneficiosas para las ciudades en climas más fríos al ayudar a reducir los costos de calefacción y las muertes relacionadas con el frío. Sin embargo, los impactos negativos de las islas de calor en verano superan los beneficios del calentamiento en invierno en la mayoría de las ciudades del mundo porque los centros de población más grandes se encuentran en climas (sub) tropicales (D. Zhou, Bonafoni, Zhang, & Wang, 2018). Los UHI de verano aumentan la mortalidad y las enfermedades relacionadas con el calor, la contaminación del aire, la demanda de energía y las emisiones indirectas de gases de efecto invernadero. Las olas de calor, por ejemplo, que las islas de calor pueden exacerbar, es uno de los principales factores de muerte relacionado con el clima en los Estados Unidos (Kaye & Flynn, 2012). La urbanización y los efectos derivados del fenómeno UHI tienen impactos que van desde escalas locales a globales, y las ciudades son un componente importante de la investigación del cambio ambiental global.

La formación del UHI está relacionada con el balance energético del área urbana. Las estructuras y materiales urbanos, el cambio de la cobertura del suelo y la actividad humana alteran los componentes individuales del equilibrio energético en las zonas urbanas y, posteriormente, el estado atmosférico. Por lo tanto, el UHI es el resultado de las diferencias de equilibrio energético urbano / rural (Voogt & Oke, 2003).

La magnitud de UHI se llama intensidad UHI. La intensidad de UHI tiende a variar tanto por hora como por temporada, y está influenciada por factores como la topografía local, la región climática, el tamaño de la ciudad, la densidad y la geometría, el desarrollo industrial, el uso del suelo y las características de la cobertura del suelo (LULC), las características de las zonas rurales circundantes, velocidad del viento y abundancia de vegetación (Simwanda, Ranagalage, Estoque, & Murayama, 2019). La cobertura de nubes y la radiación solar entrante también afectan la intensidad de UHI pero con menos importancia que las características y la abundancia de la vegetación urbana (Silva, Silva, & Santos, 2018).

Según Gartland (2012) el fenómeno isla de calor exhibe 5 características comunes:

1. Las islas de calor en el área urbana suelen ser más cálidas, en relación con el entorno rural, después de que se pone el sol, y más frescas después de que sale el sol. El aire urbano, debajo de las copas de los árboles y edificios, puede ser hasta 6 °C más cálido que el aire en las zonas rurales.
2. La temperatura del aire es impulsada por el calentamiento de las superficies urbanas, ya que muchas superficies artificiales absorben más calor del sol que la vegetación natural.
3. Estas diferencias en las temperaturas del aire y de la superficie mejoran cuando el clima es tranquilo y despejado.
4. Las áreas con menos vegetación y mayor desarrollo tienden a ser más cálidas, y las islas de calor más intensas a medida que las ciudades crecen.
5. Las islas de calor también muestran aire más cálido en la capa límite atmosférica, una capa de aire de hasta 2000 metros de altura. Las islas de calor a menudo crean grandes columnas de aire más cálido sobre las ciudades, y las inversiones de temperatura (aire más cálido sobre aire más frío).

Los beneficios de mitigar las islas de calor son muy grandes. La implementación de techos fríos, pavimentos fríos, árboles y vegetación traen muchos impactos directos a los propietarios y ocupantes de los espacios donde se implementan; además, cuando se efectúan a mayor escala, estas medidas pueden repercutir en comunidades enteras.



## 4.2 Tipos de isla de calor urbano

Si bien las temperaturas de un UHI son relativamente sencillas de medir, existen varios tipos de UHI, cada uno de los cuales es temporal y espacialmente dinámico, lo que hace que su estudio sea metodológicamente complejo. Cada uno responde a un conjunto diferente de escalas, es causado por una combinación diferente de procesos y requiere diferentes esquemas de monitoreo para medirlo y modelos para simularlo. Por lo tanto, uno no debe referirse libremente al UHI como si fuera un fenómeno unitario, sino identificar qué tipo se está midiendo, describiendo, interpretando o modelando.

Las islas de calor son una diferencia de temperatura entre las zonas urbanas y sus alrededores. Según Oke et al. (2017) existen 4 tipos de UHI, tal y como se representa en la [Ilustración 2](#).

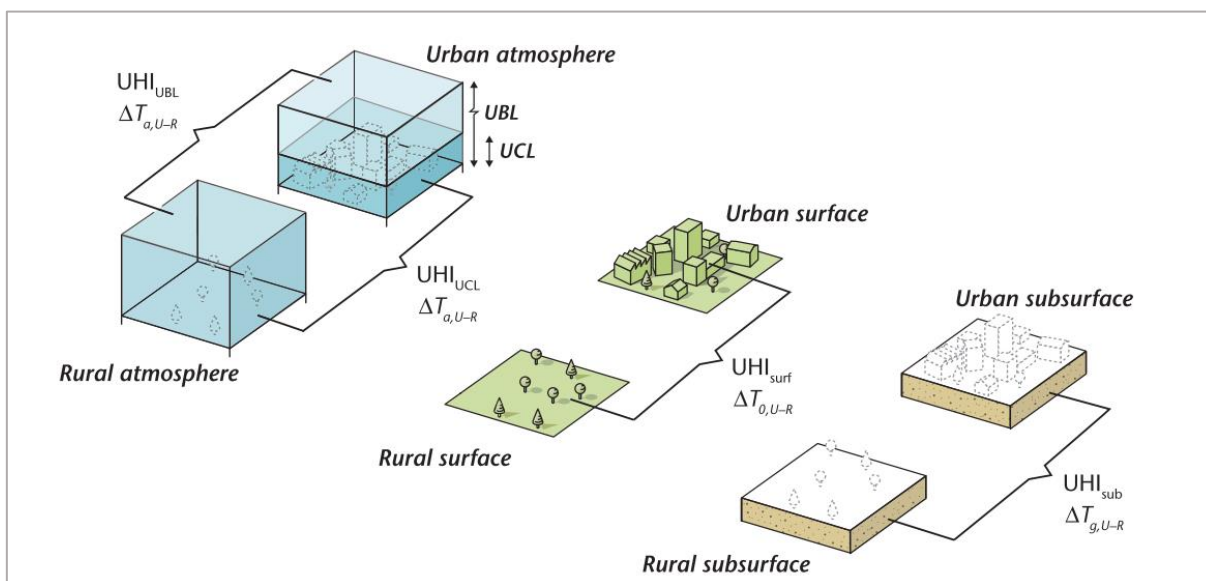


Ilustración 2. Tipos de islas de calor

Fuente: (Oke et al., 2017)

En la [Ilustración 2](#) se indican las diferencias de temperatura que forman los 4 tipos de isla de calor. En la UBL (capa de aire desde el suelo hasta la zona de arrastre), la UCL (capa de aire desde el suelo hasta aproximadamente el nivel de techo),  $\text{UHI}_{\text{surf}}$  (La superficie completa incluyendo el suelo y todos los elementos urbanos) y el  $\text{UHI}_{\text{sub}}$  (superficie del suelo a profundidad de cambio de temperatura). A continuación, se describen de manera detallada, con énfasis en la isla de calor urbano superficial, los diferentes tipos de UHI.

### 4.2.1 Isla de Calor Subsuperficial

La isla de calor subsuperficial se extiende hacia el suelo, la roca madre y el agua subterránea debajo de la ciudad. La mayor parte de la evidencia de los patrones urbanos de la isla de calor subsuperficial se obtiene de termómetros montados dentro de pozos de agua o perforaciones que se extienden desde unos 10 m hasta más de 100 m de profundidad.

### 4.2.2 Isla de Calor Superficial

En un día caluroso y soleado de verano, el sol puede calentar las superficies urbanas secas y expuestas, como los techos y el pavimento, a temperaturas de 27 a 50 °C más calientes que el aire (H. Li, 2015), mientras que las superficies sombreadas o húmedas, a menudo presentes en un entorno rural, permanecen cerca de la temperatura del aire. Las temperaturas más altas de la superficie conducen a temperaturas más altas del aire, especialmente por la noche, cuando las superficies calientes se enfrían lentamente y calientan el aire a su alrededor.

En promedio, la diferencia en las temperaturas superficiales durante el día entre las áreas desarrolladas y rurales es de 10 a 15 ° C; mientras que la diferencia en las temperaturas superficiales nocturnas es típicamente menor, de 5 a 10 ° C (Hong, Nakagoshi, Fu, & Morimoto, 2007).

La magnitud de las islas de calor urbano en la superficie varía con las estaciones, debido a los cambios en la intensidad del sol, así como en la cobertura del suelo y el clima. Como resultado de tal variación, las islas de calor urbano de superficie son típicamente más grandes en el verano.

Las islas de calor urbano de verano son más intensas cuando el cielo está despejado y los vientos están tranquilos. La fuerte capa de nubes bloquea la radiación solar, reduciendo el calentamiento diurno en las ciudades. Los vientos fuertes aumentan la mezcla atmosférica, disminuyendo la diferencia de temperatura urbano-rural (Pradhan, 2017).

Las islas de calor superficial para ciudades grandes generalmente se estiman a partir de observaciones remotas de temperatura. Los instrumentos están montados en un avión, helicóptero o plataforma satelital y miden la radiación infrarroja emitida y reflejada por las superficies. Las observaciones realizadas pueden proporcionar una imagen espacialmente continua de la temperatura urbana de una ciudad. Esto ayuda a superar las dificultades asociadas con el uso de sensores in situ para muestrear adecuadamente la amplia gama de facetas de la superficie que comprende un sistema urbano. La evaluación cuantitativa de la variación espacial de temperatura, mediante sensores remotos, requiere correcciones para los efectos atmosféricos y de emisividad de la superficie. Adicionalmente, se debe tener en cuenta que la evaluación de la isla de calor superficial de plataformas orbitales (es decir, satélites) dependen del momento del paso. Esto suele ocurrir a una hora local constante del día, lo que restringe las estimaciones a las horas del día que pueden no ser ideales. La magnitud de la isla de calor superficial también depende de si se usa una sola imagen o varias durante un período de tiempo (Ferwati et al., 2017).

Las imágenes térmicas aéreas o satelitales que incluyen una región completa de la ciudad ayudan a visualizar una imagen de la isla de calor urbana. En las imágenes térmicas registradas desde plataformas satelitales, las áreas urbanas a menudo se destacan del paisaje circundante, tanto de día como de noche. El calor relativo de las superficies construidas (especialmente cuando está seco) y su contraste con la vegetación y las superficies de agua, generalmente es inconfundible. Casi todas las estimaciones de SUHI de satélites o aviones se realizan con cielos despejados, por la sencilla razón de que las nubes impiden que la radiación de onda larga de la superficie llegue al sensor.

La magnitud y la variación temporal de la isla de calor superficial son bien conocidas. Es más fuerte durante el día cuando el calentamiento solar crea grandes diferencias entre las superficies secas y húmedas y con vegetación; la magnitud está dominada por las superficies horizontales expuestas, como techos y pavimentos (Chrysoulakis, de Castro, & Moors, 2015). Durante el día, las superficies más cálidas se miden en zonas industriales y comerciales, especialmente en aquellas con grandes edificios de superficie plana o extensas áreas abiertas de pavimento (Aeropuertos, centros comerciales y las principales intersecciones de carreteras). Es necesario mencionar que la isla de calor superficial ha sido menos estudiada en comparación con su contraparte atmosférica.

#### **4.2.3 Isla de Calor de la Capa de Dosel**

La isla de calor urbano de la capa de dosel se genera en las capas de aire más cercanas a la superficie que se extiende hasta aproximadamente la copa de los árboles o los techos de los edificios, en esta franja es en donde se realiza la mayor parte de la actividad humana. Este tipo de isla de calor son los más comúnmente observados y mencionados en la mayoría de las investigaciones de UHI.

#### **4.2.4 Isla de Calor de la Capa límite**

Las islas de calor urbano de la capa límite comienzan desde el nivel de la copa de dosel y se extiende hasta el punto donde los paisajes urbanos ya no influyen en la atmósfera. Esta región generalmente se extiende no más de una 1.5 km desde la superficie (Voogt & Oke, 2003). Es menester destacar que tanto la isla de calor de dosel como la de capa límite hacen referencia a la temperatura del aire.

### 4.3 Causas de la isla de calor

Para reducir los efectos de las islas de calor, primero se debe comprender sus causas. En 1833, Luke Howard supuso por primera vez que el exceso de calor en las ciudades se debía a humanos, animales e incendios. Al notar que las áreas urbanas aún eran más cálidas que las rurales, Howard atribuyó esto a una mayor absorción de radiación solar en la recolección de superficies verticales de una ciudad y a la falta de humedad disponible para la evaporación (Howard, 1833).

Un estudio adicional durante el siglo pasado determinó que las superficies urbanas son más calientes que las rurales por dos razones principales. Primero, las superficies artificiales generalmente están compuestas de materiales oscuros que absorben y almacenan fácilmente el calor del sol. Al exacerbar esta alta absorción solar, los edificios y los pavimentos forman cañones que tienden a atrapar el calor reflejado. En segundo lugar, la mayoría de los materiales de construcción son impermeables, por lo que el agua de lluvia se escapa y no puede disipar el calor por evaporación o evapotranspiración, cuando las plantas están involucradas (Dewan & Corner, 2013).

Hay varias razones para el fenómeno de la isla de calor: la generación de calor urbano a partir de procesos de calefacción, refrigeración, transporte y procesos industriales tienen un efecto importante en verano. Los edificios también reducen la velocidad promedio del viento, retrasando la transferencia de calor de las superficies al aire. Los niveles altos de contaminación del aire urbano también juegan un papel fundamental, ya que las partículas en el aire absorben y emiten calor a las superficies de una ciudad (Yao et al., 2018).

Las principales características urbanas que contribuyen a la formación de islas de calor se enumeran en la Tabla 1.

Tabla 1. Características importantes para la formación de islas de calor

Características que contribuyen a la formación de islas de calor	Efecto en el balance energético
Falta de vegetación	Reduce la evaporación
Uso excesivo de superficies impermeables	Reduce la evaporación
Aumento de la difusividad térmica de materiales urbanos	Aumenta el almacenamiento de calor
Baja reflectancia solar de materiales urbanos	Aumenta la radiación neta
Geometrías urbanas que atrapan el calor	Aumenta la radiación neta
Geometrías urbanas que reducen la velocidad del viento	Reduce la convección
Incremento de niveles de contaminación del aire	Aumenta la radiación neta
Mayor uso de energía	Aumento del calor antropogénico

Fuente: (Garland, 2012)

Antes de detallar las causas que generan la formación de las islas de calor es importante comprender el concepto de balance de energía en la superficie de la Tierra.

#### 4.3.1 Balance de energía

El balance de energía explica cómo se transfiere la energía hacia y desde las superficies de la Tierra. El balance de energía se basa en la primera ley de la termodinámica, que establece que la energía nunca se pierde. Para una superficie en la Tierra, esto significa que toda la energía absorbida por la superficie a través de la radiación o del calor antropogénico va a algún lado. O bien calienta el aire sobre la superficie, se evapora con humedad o se almacena en el material como calor (Takebayashi, 2015). La ecuación del balance energético es la siguiente:

$$\text{Convección} + \text{Evaporación} + \text{Calor almacenado} = \text{Radiación neta} + \text{Calor antropogénico} \quad (1)$$

La *convección* es la energía que se transfiere de una superficie sólida a un fluido (es decir, un líquido o gas), en este caso desde la superficie de la Tierra al aire por encima de ella. La convección aumenta cuando las velocidades del viento son más altas, cuando el aire se vuelve más turbulento sobre superficies más rugosas y cuando las diferencias de temperatura entre la superficie y el aire son mayores.

La *evaporación* es la energía transmitida desde la superficie de la Tierra por el vapor de agua. El agua del suelo húmedo o de las superficies húmedas se transforma en vapor cuando el sol u otras fuentes la calientan. El vapor de agua sube a la atmósfera, llevándose la energía del sol. También incluye la evapotranspiración, un proceso más complicado que usan las plantas para mantenerse climatizadas. Tanto la evaporación como la evapotranspiración aumentan cuando hay más humedad disponible, cuando la velocidad del viento es mayor y cuando el aire es más seco y cálido (Huang, Lyhyaoui, Guofang, & Benhayoun, 2015).

El *almacenamiento de calor* depende de dos propiedades de los materiales: su conductividad térmica y su capacidad calorífica (Cheshmehzangi & Butters, 2018). Los materiales con alta conductividad térmica son más capaces de dirigir el calor a sus profundidades. Los materiales con alta capacidad térmica pueden almacenar más calor.

El *calor antropogénico* representa el calor hecho por el hombre generado por edificios, maquinaria o personas. En muchas áreas, especialmente en zonas rurales y suburbanas, la cantidad de energía antropogénica es pequeña en comparación con los otros términos en la ecuación de equilibrio. En áreas urbanas densas, el término antropogénico es mayor y puede tener una influencia significativa en la formación de islas de calor.

La radiación neta abarca cuatro procesos de radiación separados que tienen lugar en la superficie de la Tierra:

$$\text{Radiación neta} = \text{Solar entrante} - \text{Solar reflejado} + \text{Rad. atmosférica} - \text{Rad. superficial} \quad (2)$$

La *energía solar entrante* representa la cantidad de energía que irradia el sol. Obviamente, esto varía según la temporada, la hora del día (cero en la noche), la cantidad de cobertura de nubes y los niveles de contaminación atmosférica.

La *radiación solar reflejada* es la cantidad de energía solar que rebota en una superficie, en función de la reflectancia solar del material. Las superficies con alta reflectancia solar, como los materiales para techos blancos brillantes, reflejan la mayor parte de la radiación solar que cae sobre ellas, mientras que las superficies oscuras como el pavimento de asfalto absorben la mayor parte de la radiación solar.

La *radiación atmosférica* es el calor emitido por partículas en la atmósfera, como las gotas de vapor de agua, las nubes, la contaminación y el polvo. Mientras más cálida sea la atmósfera y cuantas más partículas contenga, más energía emitirá (Chrysoulakis et al., 2015).

La *radiación superficial* es calor irradiado desde una superficie misma. Este término depende en gran medida de las temperaturas de la superficie y sus alrededores. Una superficie relativamente más cálida irradia más energía a su entorno.

A continuación se describen las causas de la isla de calor y cómo influyen en el equilibrio energético de una ciudad.

#### 4.3.2 Reducción de la evaporación

La distinción más notable entre zonas desarrolladas y no desarrolladas es la disminución de la energía de evaporación desde el área rural hacia los suburbios y finalmente hacia el área urbana. Este cambio coincide con una disminución en la cobertura vegetal, del 100 % de la superficie terrestre (rural), al 44 % (suburbano) a solo el 2 % (urbano). Los cambios en la energía de evaporación repercuten directamente en el aumento del almacenamiento de calor durante el día y en la liberación de calor por la noche.

Es importante tener claro que sin la salida de la energía de evaporación, las áreas urbanas y suburbanas están expuestas a almacenar más energía durante el día. La energía almacenada se libera posteriormente a la atmósfera por la noche, principalmente en forma de radiación y, en menor medida, a través de la convección.

### 4.3.3 Incremento en el almacenamiento de calor

Los materiales de construcción tienen propiedades que tienden a exacerbar el problema de la isla de calor. Dos propiedades de los materiales son importantes para el almacenamiento de calor: la conductividad térmica y la capacidad calorífica (Zeman, 2012). Los materiales con alta conductividad térmica tienden a conducir calor a sus profundidades. Los materiales con alta capacidad térmica pueden almacenar más calor en su volumen.

Una combinación de estas propiedades, llamada difusividad térmica, es un indicador importante de la facilidad con que el calor puede penetrar en un material. La difusividad térmica es la relación entre la conductividad térmica de un material y su capacidad calorífica. Los altos valores de difusividad térmica significan que el calor llega más profundo a una capa de material y las temperaturas se mantienen más constantes con el tiempo y los valores bajos indican que se calienta una capa más delgada y las temperaturas tienden a fluctuar más rápidamente (H. Li, 2015).

Las áreas rurales tienden a estar compuestas de materiales de menor difusividad térmica, mientras que las áreas urbanas tienen difusividades más altas (Weng, Quattrochi, & Gamba, 2018), lo que mejora el almacenamiento de calor durante el día y su lenta liberación por la noche.

### 4.3.4 Incremento de la radiación neta

La radiación neta recolectada por un entorno urbano es generalmente mayor que la recolectada en un área rural. La diferencia se debe a muchos factores, incluida la menor reflectancia solar de los materiales urbanos, las geometrías urbanas restrictivas y los niveles más altos de contaminación del aire en las ciudades (Meng et al., 2018). El término de radiación neta, definido en la Ecuación (2), incluye la radiación entrante del sol y la atmósfera, así como la radiación saliente reflejada y emitida desde las superficies.

La mayoría de los materiales urbanos reflejan menos energía solar entrante que los materiales que se encuentran comúnmente en las zonas rurales. Dos materiales prominentes tienen valores bajos de reflectancia solar: el pavimento asfáltico y los techos urbanizados (Gartland, 2012). El uso frecuente de estos materiales reduce la reflectancia solar general de las comunidades. Uno de los estudios más representativos sobre la importancia de las propiedades de los materiales fue el realizado por Vukovich (1983) en el cual se determinó que la reflectancia en las áreas urbanas de St Louis, Missouri, fue 4% menor que en las áreas rurales circundantes. Esto significa que el 4% más de la energía del sol se absorbe en las zonas urbanas, y esto tiende a aumentar los niveles netos de radiación durante las horas del día.

Otro factor que afecta la radiación neta es la contaminación del aire. La contaminación afecta el presupuesto de radiación de las zonas urbanas de dos maneras. Primero, durante el día, la contaminación del aire disminuye la cantidad de radiación solar que llega a la superficie de la Tierra. Segundo, la contaminación del aire también aumenta la cantidad de radiación infrarroja de onda larga emitida desde la atmósfera a la Tierra (Sahana, Ahmed, & Sajjad, 2016). Las partículas reflejan mucha radiación, tanto del sol como de la Tierra.

Estos dos efectos de la contaminación, la reducción de la radiación solar y el aumento de las emisiones atmosféricas, funcionan en oposición al término de radiación neta. Los niveles y tipos de contaminación varían enormemente, por lo que durante el día es difícil decir exactamente cuáles son los efectos netos de la contaminación. Pero por la noche, cuando la energía solar no es un factor, la contaminación del aire urbano definitivamente aumenta los niveles netos de radiación.

### 4.3.5 Reducción de la convección

Ya se ha demostrado que las islas de calor son más intensas durante el clima tranquilo y despejado (dos Santos et al., 2017; Hazra, Mukhopadhyay, Ghosh, Mitra, & Dadhwal, 2017). En gran medida, esto se debe a que la convección de calor de las superficies al aire se reduce cuando la velocidad del viento es baja. Las velocidades bajas del viento tienden a aumentar el almacenamiento de calor durante el día y retrasar la liberación de calor por la noche.



Las ciudades también tienden a tener vientos más lentos que las zonas rurales. Los edificios en áreas urbanas y suburbanas actúan como cortavientos, reduciendo la velocidad del viento hasta en un 60 % (Gartland, 2012).

#### **4.3.6 Incremento del calor antropogénico**

El calor antropogénico es generado por la actividad humana y proviene de muchas fuentes, como edificios, procesos industriales, automóviles e incluso las propias personas. Para determinar cuánto calor antropogénico se produce en cualquier región, se debe contar todo el uso de energía (comercial, residencial, industrial y de transporte). La suma se divide por el área de la región para permitir hacer comparaciones de diferentes ciudades. El aumento de calor antropogénico suele ser mayor en invierno que en verano.

#### **4.4 Efectos de las islas de calor**

Las temperaturas elevadas en el entorno urbano, particularmente durante el verano, pueden afectar el medio ambiente y la calidad de vida de una comunidad en particular. Si bien algunos impactos de las islas de calor parecen positivos, como alargar la temporada de crecimiento de las plantas y reducir el uso de energía de calefacción en climas fríos, la mayoría de los impactos son negativos y se enumeran de la siguiente manera:

##### **4.4.1 Reducción en la salud y la comodidad humana**

El aumento de la temperatura diurna tanto en el pavimento como en el aire cercano a la superficie, la reducción del enfriamiento nocturno y los niveles más altos de contaminación del aire, pueden afectar la salud humana al contribuir a la incomodidad general, dificultades respiratorias, agotamiento, golpes de calor y la mortalidad relacionada con el calor (Yao, Wang, Huang, Gong, & Xia, 2019). Las islas de calor también pueden exacerbar el impacto de las olas de calor, que son períodos de clima anormalmente calurosos. La población vulnerable, como los niños, los adultos mayores y las personas con problemas de salud existentes, corren un riesgo particular de estos eventos. Los eventos de calor excesivos, o los aumentos bruscos y dramáticos de la temperatura, son particularmente peligrosos y contribuyen a muertes prematuras, lo que puede resultar en tasas de mortalidad superiores al promedio (Hardin et al., 2017).

Además del impacto en la salud humana, la incomodidad causada por el estrés del calor en el pavimento probablemente desanime a las personas a caminar o andar en bicicleta, lo que reducirá la probabilidad de viajes de corta distancia y actividad física de las personas al caminar o andar en bicicleta. Esto será perjudicial para alcanzar una comunidad sostenible, habitable y transitable.

##### **4.4.2 Incremento en el uso de energía**

Las temperaturas elevadas en las ciudades aumentan potencialmente la demanda de energía para la refrigeración de los edificios en regiones cálidas. Además del uso de energía adicional para la refrigeración de edificios, las temperaturas altas también aumentan el uso de energía para la refrigeración de vehículos. Las islas de calor urbanas podrían aumentar la demanda máxima, así como la demanda general de electricidad. Esto generalmente ocurre en las calurosas tardes de verano, cuando la mayoría de los sistemas de enfriamiento, luces y otros electrodomésticos en oficinas y hogares funcionan simultáneamente.

##### **4.4.3 Emisiones elevadas de contaminantes atmosféricos y gases de efecto invernadero**

Como se describió anteriormente, las islas de calor urbano aumentan la demanda de energía eléctrica en verano. Las empresas más grandes que suministran electricidad generalmente dependen principalmente de plantas de energía de combustibles fósiles en los Estados Unidos y aún más en China e India para satisfacer gran parte de esta demanda, lo que a su vez conduce a un aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes del aire (Ricardo D. Lopez, 2017). Los contaminantes primarios de las plantas de energía de combustibles fósiles incluyen dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), óxidos de nitrógeno

(NO<sub>x</sub>), material particulado, monóxido de carbono (CO) y mercurio (Hg). Estos contaminantes son perjudiciales para la salud humana y también contribuyen a problemas complejos de calidad del aire, como la formación de ozono a nivel del suelo (smog), partículas finas y lluvia ácida. El mayor uso de las plantas de energía de combustibles fósiles también aumenta las emisiones de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), que contribuyen al cambio climático global.

Además de su impacto en las emisiones relacionadas con la energía, las temperaturas elevadas pueden aumentar directamente la tasa de formación de ozono a nivel del suelo. El ozono a nivel del suelo se forma cuando el NO<sub>x</sub> y los compuestos orgánicos volátiles reaccionan en presencia de la luz solar y el clima cálido (Swamy, Shiva Nagendra, & Schlink, 2017). Si todas las demás variables son iguales, como el nivel de emisiones de precursores en el aire y la velocidad y dirección del viento, se formará más ozono a nivel del suelo a medida que el ambiente se calienta (Y. Wang et al., 2018).

#### **4.4.4 Deterioro de la calidad de agua**

Las altas temperaturas de la superficie del pavimento pueden calentar la escorrentía de aguas pluviales. Las pruebas han demostrado que los pavimentos que están a 38° C pueden elevar la temperatura inicial del agua de lluvia de aproximadamente 21 ° C a más de 35° C. Este agua pluvial calentada generalmente se convierte en escorrentía, lo que aumenta la temperatura del cuerpo del agua si se drena en arroyos, ríos, estanques y lagos (H. Li, 2015).

La temperatura del agua afecta todos los aspectos de la vida acuática, especialmente el metabolismo y la reproducción de muchas especies. Los rápidos cambios de temperatura en este tipo de ecosistemas resultan de la escorrentía de aguas pluviales cálidas que pueden ser particularmente estresantes, incluso fatales para la vida acuática. Sin embargo, si se usan pavimentos permeables para reducir la escorrentía de las aguas pluviales e infiltrar el agua en el suelo, para no liberarla directamente en cuerpos de agua como ríos, estanques, etc., los efectos sobre la vida acuática se mitigarán e incluso se eliminarán.

#### **4.4.5 Vida del pavimento**

Las temperaturas del pavimento pueden tener una influencia significativa en la durabilidad del pavimento. Para pavimentos de asfalto en climas cálidos, las altas temperaturas en verano pueden aumentar significativamente el riesgo de surcos (deformación permanente) y envejecimiento, y grietas, si no se diseñan adecuadamente (Sen & Roesler, 2019).

Para pavimentos de hormigón, las altas temperaturas y los gradientes de temperatura pueden aumentar significativamente la probabilidad de grietas causadas por el estrés térmico (Xie, Li, Abdelhady, & Harvey, 2019). Sin embargo, para diferentes tipos de pavimento, los efectos de la temperatura en la durabilidad son diferentes. Además, los efectos exactos en algunos pavimentos, como los pavimentos permeables, aún no están muy claros.

Los pavimentos fríos y las tecnologías de enfriamiento reducirían potencialmente la temperatura y el gradiente de temperatura del pavimento y, por lo tanto, podrían mejorar la durabilidad del pavimento debido a la mitigación de los deterioros relacionados con la temperatura, como la formación de surcos y grietas. En general, esto podría reducir los costos de mantenimiento del pavimento y también aportar otros beneficios asociados, como el uso reducido de materiales y el retraso del tráfico de usuarios (Y. Qin, 2015).

#### **4.5 Mitigación de la isla de calor**

La mayoría de los esfuerzos, para mitigar la isla de calor, se han centrado en cambiar las propiedades de la superficie urbana para modificar su radiación (al reemplazar los materiales con una nueva cubierta de superficie para reducir la ganancia de calor radiativo en el material) y las propiedades de evaporación. Se ha encontrado que la vegetación es una herramienta versátil para mitigar el ambiente térmico local. Se puede usar para proporcionar sombra, aislamiento térmico para mantener el interior fresco y enfriamiento por evaporación, y controlar el ruido y la contaminación del aire (Xie et al., 2019).

Donde hay agua disponible, el enfriamiento por evaporación de la vegetación colocada estratégicamente puede mitigar aún más el ambiente térmico. Las poblaciones urbanas en las regiones cálidas y húmedas de los trópicos están expuestas a los efectos negativos del UHI anualmente debido a la alta radiación solar incidente, la baja velocidad del viento y la falta de inviernos fríos. Aquí, las opciones de mitigación deben promover la ventilación, por ejemplo, mediante la manipulación de la geometría o la orientación de la calle para aprovechar los patrones de viento preferenciales o proporcionar sombra, por ejemplo, mediante el uso de medios artificiales (voladizos o marquesinas) o aprovechando la abundante vegetación natural, que también puede proporcionar enfriamiento por evaporación.

En los Estados Unidos, la Agencia de Protección Ambiental (EPA) ha desarrollado un enfoque triple de (1) pavimentos frescos, (2) silvicultura urbana y vegetación, y (3) techos frescos y techos verdes para mitigar el UHI (Cole et al., 2008). Independientemente de los enfoques desarrollados por la EPA, las comunidades pueden tomar una serie de pasos potenciales para reducir el efecto de la isla de calor, como las estrategias que se enumeran a continuación basadas directamente en las causas de la isla de calor que figuran en la Tabla 1.

1. Aumento de la cubierta vegetal y arbórea.
2. Creación de techos verdes (conocidos como jardines en terrazas o techos ecológicos).
3. Instalación de techos principalmente reflectivos.
4. Uso de pavimentos fríos.
5. Introducción de cuerpos de agua en el área urbana.
6. Reducción del calor antropogénico (calor residual liberado por calentamiento y enfriamiento).
7. Mejoramiento de la geometría urbana para mejorar el flujo de aire y mejorar la ventilación natural.

#### ***4.6 Beneficios de la mitigación de la isla de calor***

El uso de estrategias de mitigación de las islas de calor puede hacer que las comunidades sean más habitables. La implementación generalizada de techos fríos y pavimentos fríos y la plantación de árboles y vegetación en un vecindario pueden hacer que sea más saludable, más hermoso y menos costoso de operar y mantener. En este acápite se describen los principales beneficios para la comunidad de la mitigación de la isla de calor.

##### **4.6.1 Reducción de temperaturas**

Los materiales de construcción utilizados tradicionalmente en la mayoría de las ciudades de hoy en día se calientan bastante en verano. Las medidas de mitigación de la isla de calor reducen las temperaturas de la superficie de los techos y pavimentos.

La Ilustración 3 muestra qué tan calientes pueden llegar a ser estas superficies, en comparación con sus contrapartes frías. Sin sombra, los materiales para techos pueden calentarse hasta 90° C y los pavimentos pueden alcanzar los 70° C. Los materiales para techos y pavimentos fríos se calientan a menos de 50° C, mientras que los árboles y la vegetación bien irrigados, y las áreas sombreadas debajo de ellos, permanecen por debajo de 38° C. Si las superficies frías y la vegetación se usan ampliamente en una comunidad, la temperatura promedio de la superficie se puede reducir en más de 14° C.



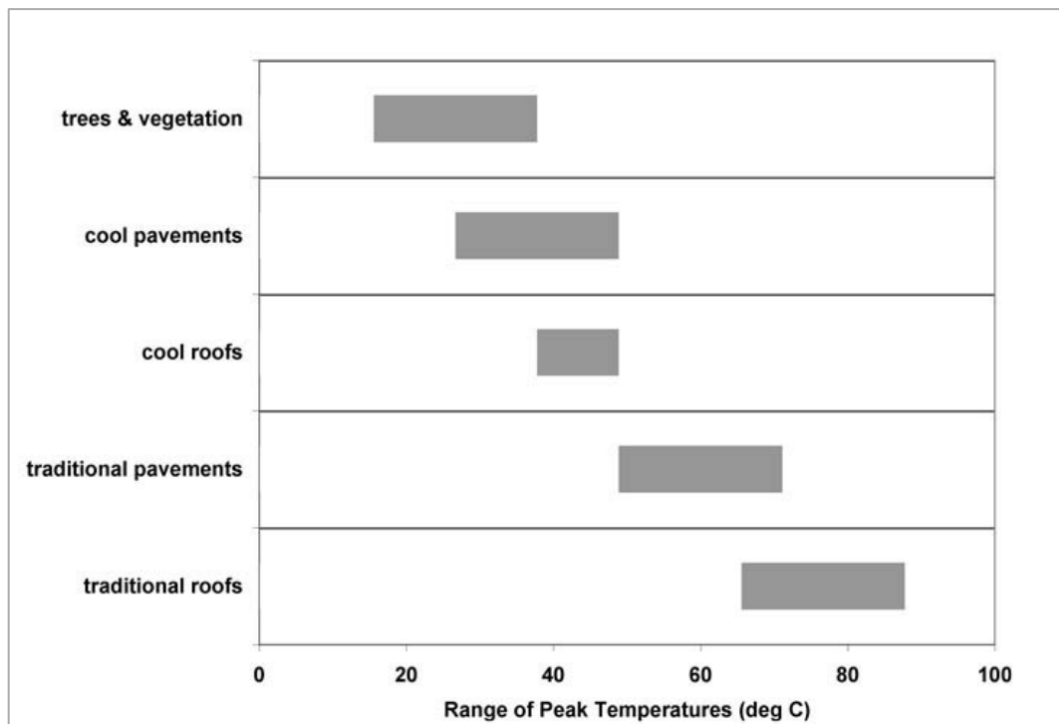


Ilustración 3. Rango de temperatura de diferentes materiales superficiales

Fuente: (Gartland, 2012)

#### 4.6.2 Ahorros de energía

Al reducir la cantidad de energía solar que absorbe un edificio, los techos fríos y los árboles de sombra reducen directamente el uso de energía de enfriamiento de edificios individuales. Los techos fríos, el pavimento frío y la vegetación también enfrían el aire alrededor de los edificios. Esto indirectamente reduce la necesidad de enfriamiento dentro del edificio. Cuando estas medidas se multiplican en toda una comunidad, estas reducciones de enfriamiento directas e indirectas se suman a caídas significativas en el uso de energía eléctrica y la demanda pico de electricidad en la región (Chatterjee et al., 2019).

#### 4.6.3 Mejoramiento en la calidad del aire

La mitigación de la isla de calor mejora la calidad del aire de una comunidad de tres maneras diferentes. Primero, las comunidades más frías usan menos energía y producen menos contaminación de las centrales eléctricas. En segundo lugar, la vegetación y los árboles adicionales eliminan más contaminantes del aire. En tercer lugar, las temperaturas más frescas disminuyen la formación de smog.

Cuando se queman combustibles fósiles para generar electricidad o producir calor, se emiten varios subproductos dañinos. Si se implementan medidas de isla de calor, se usa menos energía durante el verano y se pueden reducir las emisiones. En invierno, las medidas de mitigación de las islas de calor tienden a aumentar la cantidad de calor necesaria y a aumentar las emisiones de combustibles fósiles. Sin embargo, en la mayoría de las ciudades, a pesar de las emisiones de invierno ligeramente más altas, las emisiones anuales totales se reducen.

Un subproducto de la combustión de combustibles fósiles es el dióxido de carbono, conocido por ser un gas de efecto invernadero, que atrapa más calor en la atmósfera de la Tierra. La Ilustración 4 muestra cómo las emisiones de carbono pueden reducirse mediante la mitigación de las islas de calor en cinco ciudades de los EE. UU. Estas reducciones netas incluyen tanto las disminuciones de verano como los aumentos de invierno en las emisiones de combustibles fósiles.

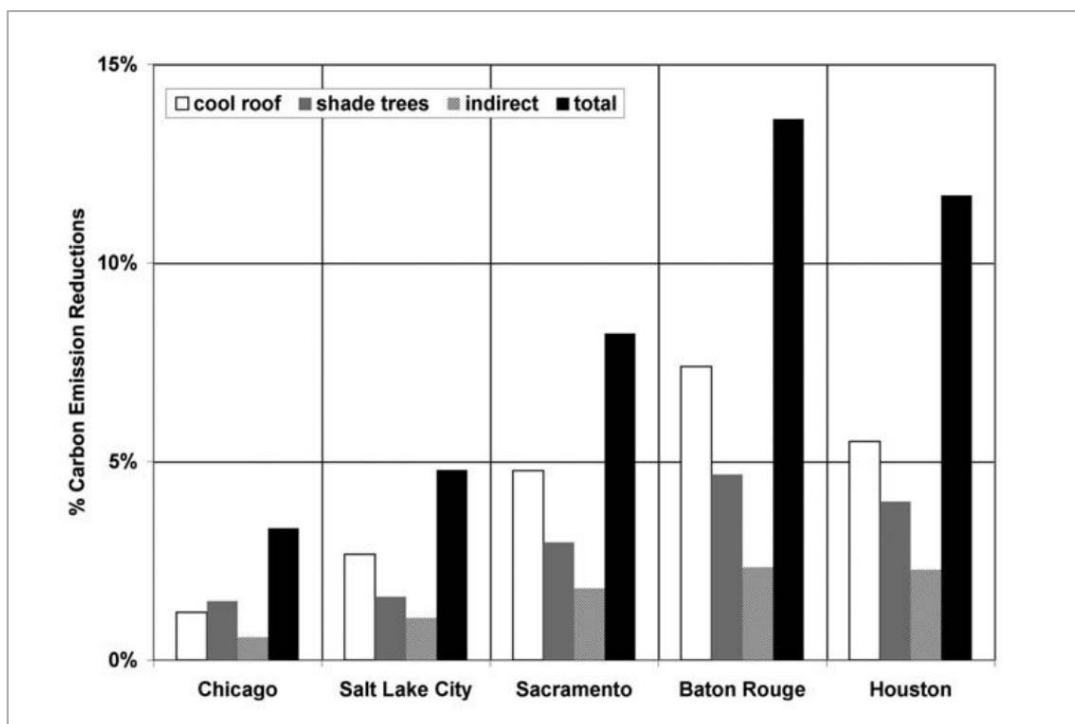


Ilustración 4. Reducción de emisiones de carbono en cinco ciudades de Estados Unidos

Fuente: (Gartland, 2012)

Los árboles y la vegetación mejoran la calidad de la atmósfera de dos maneras. Primero, durante el proceso de fotosíntesis, las plantas absorben dióxido de carbono del aire, almacenan el carbono para su crecimiento y emiten el oxígeno de regreso a la atmósfera. En segundo lugar, las hojas eliminan varios contaminantes del aire mediante un proceso llamado deposición seca. Los contaminantes eliminados incluyen óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, partículas y ozono a nivel del suelo (Gartland, 2012).

La magnitud de estos dos efectos varía de una ciudad a otra dependiendo de los tipos de plantas presentes, su nivel de madurez y tasa de crecimiento, y el clima local.

Los efectos de la mitigación de la isla de calor sobre el ozono son extremadamente complejos, porque la formación de ozono es un proceso complicado. El ozono, que es el componente principal del smog, no sale directamente de las chimeneas de fábrica o de los tubos de escape de los automóviles, sino que se forma por una reacción química entre los óxidos de nitrógeno (NOx) y los compuestos orgánicos volátiles (COV) en el aire (Yadav et al., 2017). La reacción depende de cuánto de estos contaminantes hay en el aire, qué tan bien se mezclan y qué tan caliente está el aire. Cuanto más caluroso es el día, más rápido se produce la reacción y se forma más smog.

Las medidas de mitigación de la isla de calor tienen dos efectos sobre la formación de ozono. Por un lado, las temperaturas más bajas del aire reducen la formación de smog; Por otro lado, algunos tipos de árboles y vegetación emiten COV al aire, lo que aumenta la formación de smog.

Las emisiones de COV de los árboles y la vegetación representan una parte considerable de las emisiones totales de COV en cualquier área. Por ejemplo, los árboles y la vegetación emiten el 42 % del total de COV presentes en el área de Dallas y el 65 % del total en el área de Houston (Gartland, 2012).

Como se discutió anteriormente, las emisiones de COV de las plantas varían ampliamente de una especie a otra. Agregar el tipo incorrecto de árboles y vegetación para reducir la isla de calor puede terminar aumentando la formación de ozono, por lo que es importante seleccionar los árboles y la vegetación con mucho cuidado.

#### 4.6.4 Comodidad y mejora de la salud

Las medidas de mitigación de la isla de calor pueden ayudar a mejorar la comodidad y la salud humana de tres maneras. Primero, reducen los problemas relacionados con el calor, como el estrés por calor y la mortalidad relacionada. En segundo lugar, ayudan a reducir los problemas de salud relacionados con la calidad del aire, como el asma. En tercer lugar, pueden reducir los problemas relacionados con la luz solar, como el cáncer de piel (Abaas, 2020).

El estrés por calor, o un aumento de la temperatura corporal, puede ocurrir con bastante facilidad en climas cálidos, especialmente si no se tiene una hidratación adecuada o al hacer ejercicio. Los resultados del estrés por calor prolongado varían de problemas leves a severos e incluyen calambres, desmayos, agotamiento por calor, golpe de calor e incluso la muerte. Se ha encontrado que las muertes relacionadas con el calor aumentan notablemente durante las olas de calor. Una de las olas de calor más trascendentales, fue el evento de calor de 5 días ocurrido en Chicago durante julio de 1995, se consideró responsable de al menos 700 muertes (Kunkel, Changnon, Reinke, & Arritt, 1996).

La mitigación de la isla de calor puede ofrecer mucha ayuda para reducir el estrés por calor. El uso de techos fríos y árboles de sombra puede mantener las temperaturas del aire interior mucho más frescas durante los eventos de calor a largo plazo. Como se vio en la ola de calor de Chicago en 1995, muchas de las personas que murieron vivían en apartamentos en el último piso bajo techos calientes, con ventanas orientadas al sur y al oeste (Kunkel et al., 1996). La adición de techos fríos, pavimentos fríos y árboles y vegetación también pueden enfriar las temperaturas del aire exterior. Incluso pequeñas diferencias de temperatura de un grado o dos pueden marcar una diferencia que salva vidas al prevenir el estrés por calor.

#### 4.6.5 Reducción de escorrentía de aguas pluviales

Dos estrategias para mitigar la isla de calor también pueden reducir la cantidad de escorrentía de aguas pluviales: (1) árboles y vegetación y (2) pavimentos permeables. El suelo expuesto puede absorber solo una gran cantidad de agua durante una tormenta. Si la lluvia cae demasiado rápido o el suelo se satura, la lluvia restante se escurre. Los problemas de escorrentía se ven exacerbados en las ciudades y suburbios por la gran cantidad de superficies pavimentadas e impermeables. En la mayoría de las comunidades, el suelo expuesto restante no puede absorber la lluvia que drena de las superficies y edificios pavimentados adyacentes.

La reducción de la escorrentía de aguas pluviales puede disminuir el tamaño o incluso la necesidad de costosos sistemas de drenaje. Esto puede reducir la energía necesaria para bombear aguas pluviales a su destino final y también ahorrar el dinero y la mano de obra utilizada para ejecutar y mantener estos sistemas. Los árboles y la vegetación atrapan la lluvia en sus hojas, ramas y troncos, lo que reduce y ralentiza la cantidad de agua que llega al suelo.

Los pavimentos permeables, o pavimentos que permiten que el agua penetre en el pavimento, también son efectivos para reducir la escorrentía de aguas pluviales. Las pruebas al aire libre y las mediciones de laboratorio han encontrado que los pavimentos permeables pueden reducir la escorrentía hasta en un 90 % (Takebayashi, 2015). La cantidad de agua que se puede recolectar varía según el tipo de suelo utilizado y el tamaño de los intersticios en los pavimentos, así como de la capacidad de absorción de los materiales que soportan el pavimento. Hay muchos tipos de pavimentos porosos o permeables disponibles. Los adoquines de bloques se pueden llenar con tierra y hierba o con rocas pequeñas. Los pavimentos tradicionales de asfalto y concreto también se pueden volver porosos dejando fuera la arena y los pequeños agregados de la mezcla de concreto (Hendel, Parison, Grados, & Royon, 2018).

Además de ser difícil de manejar, la escorrentía de aguas pluviales también tiende a traer contaminantes y calor de las superficies urbanas a las corrientes locales. La escorrentía, que no se filtra por el suelo, tiende a retener niveles más altos de nitratos, ácido, metales pesados, petróleo y grasa (Marchioni & Becciu, 2015). La contaminación y las temperaturas elevadas de la escorrentía de aguas pluviales degradan la calidad del agua y la vida acuática de los arroyos y lagunas.

#### 4.6.6 Mantenimiento y reducción de residuos

Los materiales para techos y pavimentos a base de asfalto tienden a sufrir los efectos del sol y el calor. La radiación ultravioleta del sol fomenta una reacción química que degrada los materiales a base de asfalto, y cuanto más cálido es el material, más rápido se produce esta reacción (Sen & Roesler, 2019). Los cambios diarios de temperatura, desde el calor durante el día hasta el frío por la noche, hacen que los materiales se hinchen y contraigan repetidamente. Con el tiempo, estos procesos químicos y mecánicos hacen que muchos techos y pavimentos sean frágiles, y las tensiones térmicas recurrentes hacen que los materiales se agrieten.

Diseñar los pavimentos y los techos considerando los efectos de las islas de calor puede aumentar significativamente la vida útil de estos materiales. Una vida útil más larga significa que los materiales no necesitarán repararse o reemplazarse con tanta frecuencia, lo que puede ahorrar una enorme cantidad de dinero en repavimentación y retechado. El uso de materiales para techos y pavimentos de mayor duración también tiene el potencial de reducir la cantidad de desechos que se envían a los rellenos sanitarios.

Tabla 2. Estimación de desechos de pavimentos, techos producidos y reciclados anualmente en EE.UU.

	Desechos producidos	Desechos reciclados	Desechos para vertederos
Pavimento de concreto	3 millones de Tm	Desconocido	Desconocido
Pavimento de asfalto	100 millones de Tm	80 millones de Tm	20 millones de Tm
Teja para techos	11 millones de Tm	< 0.1 millones de Tm	11 millones de Tm
Total	114 millones de Tm	Al menos 80 millones Tm	Al menos 31 millones de Tm

Fuente: (Gartland, 2012)

La Tabla 2 muestra la cantidad de desechos de pavimentos y techos que se producen, reciclan y tiran anualmente en los Estados Unidos. Una parte importante de los 114 millones de toneladas de escombros de pavimentos y techos producidos anualmente en los Estados Unidos está siendo reciclada.

La mayor parte del pavimento de asfalto y concreto, se recicla nuevamente en la base de la carretera o en el pavimento nuevo, o se usa como relleno en proyectos de construcción de edificios (Chatterjee et al., 2019). En este punto, se reciclan muy pocos desechos de techos, pero existe la posibilidad de reciclarlos en pavimentos asfálticos, bases de carreteras o compuestos de reparación de carreteras. Sin embargo, incluso con el reciclaje de materiales, al menos 31 millones de toneladas de materiales para carreteras y techos se envían a los rellenos sanitarios cada año. Esto no solo ocupa un espacio cada vez menor en los vertederos, sino que representa un gasto económico oneroso.

#### 4.6.7 Beneficios de calidad de vida

La mitigación de la isla de calor trae muchos beneficios a una comunidad, incluida la reducción de ruido, la mejora del ecosistema y las mejoras estéticas. La reducción de ruido es un beneficio especialmente útil para las áreas urbanas. Las medidas de mitigación de la isla de calor son útiles para reducir los niveles de ruido exterior, como los del tráfico de la calle.

Varios estudios han encontrado que un árbol bien ubicado puede reducir el ruido urbano hasta en 15 decibelios aproximadamente, así como una barrera de sonido típica de mampostería (Nowak & Dwyer, 2000). También se ha descubierto que los pavimentos porosos, como el asfalto abierto y el concreto permeable, reducen el ruido del tráfico en 2 a 8 decibelios y mantienen los niveles de ruido por debajo de 75 decibeles (Elizondo-Martínez, Andrés-Valeri, Jato-Espino, & Rodríguez-Hernandez, 2020). Los poros en estas superficies del pavimento absorben el ruido de los neumáticos que ruedan a lo largo del pavimento.

Agregar árboles y vegetación a las áreas urbanas, ya sea en parques, a lo largo de las calles, en estacionamientos o en el techo de un jardín, mejora el ecosistema local al darles a las aves, animales e insectos un hogar. La calidad de este nicho ecológico es aún mejor si se eligen y reintroducen especies de plantas nativas en el paisaje urbano. Los humanos también tienen un hogar mejor, ya que se ha

descubierto que los jardines y parques comunitarios reducen el estrés fisiológico, mejoran el bienestar, reducen los conflictos domésticos y disminuyen la agresión escolar (Wolf, 1998).

Las comunidades no tienen que expresar falta de vida. El uso de paisajismo, techos verdes y pavimentos fríos puede aportar color, diseño y belleza a las áreas tradicionalmente áridas de las comunidades.

#### **4.7 Medición de la isla de calor**

La forma ideal de medir la isla de calor de cualquier ciudad sería examinar los patrones climáticos regionales con y sin la ciudad en su lugar. Claramente, es imposible eliminar y reemplazar ciudades, por lo que en el mundo real, se utilizan cinco métodos básicos para medir los efectos del desarrollo en el clima urbano:

- Estaciones fijas
- Recorridos móviles
- Sensores verticales
- Balances de energía
- Sensores remotos

Medir los efectos de una isla de calor en el clima regional es útil e interesante, pero no puede decirnos cuán efectivas serían las medidas de mitigación para reducir los impactos de una isla de calor. Se están utilizando muchos tipos diferentes de modelos para predecir qué tan bien las medidas de mitigación pueden reducir las temperaturas urbanas, el uso de energía y la contaminación del aire. En la presente sección solamente se tratarán las técnicas para medir las islas de calor.

##### **4.7.1 Estaciones fijas**

El método más simple y más común para analizar la isla de calor es comparar los datos meteorológicos existentes de dos o más ubicaciones fijas. La mayoría de las ciudades del mundo tienen estaciones meteorológicas con años de información acumulada sobre la temperatura del aire, la velocidad del viento, la capa de nubes, la humedad y los niveles de precipitación. Hay muchas estaciones meteorológicas ubicadas en la mayoría de las comunidades, incluidas las operadas por organizaciones nacionales de servicios meteorológicos, universidades locales, estaciones de televisión y empresas de servicios públicos. Los archivos a largo plazo de datos meteorológicos se han vuelto más accesibles con el advenimiento de la tecnología e Internet.

Los datos de estaciones fijas se han usado comúnmente de tres maneras diferentes: (1) comparando datos de un solo par de estaciones meteorológicas urbanas y rurales, (2) estudiando datos de múltiples estaciones para encontrar impactos regionales y (3) investigando un gran conjunto de datos históricos para evaluar las tendencias de las islas de calor a lo largo del tiempo a medida que se desarrolla una región.

##### **4.7.2 Recorridos móviles**

Con frecuencia hay muy pocas estaciones fijas disponibles en los lugares correctos alrededor de una ciudad para obtener una imagen clara en dos dimensiones de la isla de calor. Configurar estaciones temporales para recopilar datos en ubicaciones fijas adicionales puede ser difícil y costoso. Hacer un recorrido móvil es una forma económica de estudiar la isla de calor de un área urbana y sus alrededores suburbanos y rurales.

Un recorrido móvil implica viajar por un camino predeterminado a lo largo de una región, deteniéndose en lugares representativos para tomar lecturas usando solo un conjunto de instrumentos meteorológicos. Los recorridos móviles se pueden realizar en cualquier momento del día o de la noche, aunque a veces

esto depende de las condiciones del tráfico. La mayoría de los estudios realizan recorridos nocturnos durante un clima tranquilo y despejado para medir las intensidades máximas de las islas de calor.

Existen algunos inconvenientes en el uso del método de desplazamiento móvil para medir las islas de calor. Una es la incapacidad de registrar mediciones simultáneas en diferentes ubicaciones. Es posible usar dos o más juegos de equipos de viaje al mismo tiempo, pero esto al menos duplica el costo del equipo. La mayoría de los recorridos se pueden completar en menos de una hora, pero las condiciones pueden variar significativamente en ese momento. Las temperaturas a menudo deben ajustarse a un tiempo de referencia comparando las mediciones móviles con los datos de una o más ubicaciones fijas.

#### **4.7.3 Sensores verticales**

La superficie de la Tierra influye en los 10 kilómetros más bajos de la atmósfera de la Tierra, llamada troposfera. La mayoría de estos efectos se limitan a una región menos profunda de 1 a 1.4 kilómetros llamada capa límite atmosférica, donde el calor y el arrastre de la superficie crean turbulencia. Los sensores verticales generalmente analizan el perfil hasta la capa límite. Estos métodos incluyen enviar globos instrumentados a diferentes alturas, instalar equipos de monitoreo en torres de radio o volar a diferentes altitudes en un helicóptero. Tomar medidas verticales alrededor de una ciudad y sus alrededores pueden dar una mejor comprensión del efecto de la isla de calor en el clima local.

#### **4.7.4 Balance de energía**

Medir la energía que fluye dentro y fuera de las superficies es una forma sofisticada de medir los efectos de la isla de calor. Este método también proporciona una mejor comprensión de los orígenes de la isla de calor. Este método se basa en la primera ley de la termodinámica y concisamente se basa en a partir de los instrumentos correspondientes y encontrando cada uno de los parámetros que se indican en la Ecuación (1). Los experimentos de balance de energía utilizan muchos equipos para medir la energía que fluye dentro y fuera de las superficies. Se pueden hacer cuatro mediciones separadas para evaluar el término de radiación neta:

- radiación solar entrante (onda corta) usando un piranómetro o albedómetro.
- radiación solar entrante (onda corta) usando un piranómetro o albedómetro.
- radiación atmosférica (onda larga) usando un radiómetro
- Radiación superficial (onda larga) utilizando un medidor de pirgeómetro.

Para reducir los costos de los equipos, los experimentos de balance de energía generalmente no miden cada término. A veces, el almacenamiento de calor no se mide, sino que se calcula a partir de la ecuación del balance de energía.

#### **4.7.5 Sensores remotos**

Las estaciones fijas y los recorridos móviles generalmente se usan para monitorear las temperaturas del aire alrededor de una ciudad. La teledetección se puede utilizar para encontrar temperaturas y otras características de las superficies, por ejemplo, techos, pavimentos, vegetación y suelo desnudo, midiendo la energía reflejada y emitida por ellos. Se utilizan equipos especializados en aviones o satélites para tomar imágenes de la energía visible e invisible que irradia desde las ciudades y sus alrededores.

Debido a que los satélites constantemente circulan por la Tierra, no registran información continua durante un período diario; por lo general, pasan sobre un área dos veces al día, por lo que las características térmicas diurnas y nocturnas se pueden comparar, para así examinar las variaciones estacionales. Se pueden realizar vuelos especializados en avión a cualquier hora del día, por lo que pueden ser más útiles para capturar patrones diarios de comportamiento de las islas de calor, pero estos vuelos son caros de realizar y a menudo necesitan un permiso especial para volar a altitudes más bajas de lo que normalmente se permite.



La ventaja de utilizar la teledetección es su poder para visualizar temperaturas en grandes áreas. Sin embargo, la teledetección muestra solo una vista panorámica de las temperaturas urbanas, dejando de lado las temperaturas de las paredes y la vegetación y las temperaturas debajo de los árboles. Estas superficies verticales y sombreadas son tan importantes para la isla de calor urbana como las superficies vistas desde arriba.

Es menester recalcar que en la sección 4.8 *Sensores remotos aplicados a la medición de la isla de calor* se describe de forma expandida todo lo correspondiente a dicha ciencia y su aplicación al monitoreo de la magnitud de la isla de calor.

#### **4.8 *Sensores remotos aplicados a la medición de la isla de calor***

Los estudios urbanos utilizan convencionalmente información demográfica o geográfica para representar el estado del entorno urbano, las características del paisaje urbano, los cambios que han tenido lugar a lo largo del tiempo y las presiones sobre el área urbana. Dicha información debe ser espacial y temporalmente densa, un hecho que implica la necesidad de monitorear redes o experimentos especiales que tengan la capacidad de reflejar suficientemente el área bajo investigación. A pesar de las mejoras en nuestra comprensión sobre la importancia de las áreas urbanas, pocas ciudades o aglomeraciones urbanas operan redes de monitoreo que pueden considerarse suficientes. Para muchos planificadores urbanos, la teledetección proporciona una alternativa confiable a las técnicas convencionales. Sin embargo, se está debatiendo mucho sobre la capacidad real de la teledetección para apoyar los estudios urbanos. Tal discusión se relaciona principalmente con la resolución (temporal, espacial, espectral) de imágenes de satélite.

La teledetección es el arte, la ciencia y la tecnología de adquirir información sobre objetos físicos y el medio ambiente a través del registro, medición e interpretación de imágenes y representaciones digitales de patrones de energía derivados de sensores que no están en contacto con el objeto de estudio (Baghdadi & Mehrez Zribi, 2016). La tecnología de la teledetección moderna comenzó con la invención de la cámara hace más de 150 años, y ahora se ha desarrollado una amplia variedad de sistemas de teledetección para detectar y medir patrones de energía de diferentes partes del espectro electromagnético. Una de las áreas de aplicación de la teledetección satelital es el estudio de las áreas urbanas. Esta sección proporciona información sobre el potencial de la teledetección satelital para el estudio de la climatología urbana y, en particular, el fenómeno de la isla de calor urbano superficial (Pirasteh & Li, 2017).

Aunque el estudio de muchas aplicaciones urbanas se basa en imágenes en las partes visibles e infrarrojas cercanas del espectro, las imágenes satelitales en el infrarrojo térmico tienen un excelente potencial en términos de apoyo a los estudios microclimáticos urbanos. Un claro ejemplo son los estudios del fenómeno de la isla de calor urbano superficial (SUHI), es decir, donde las temperaturas cálidas urbanas en la superficie contrastan con las de las áreas circundantes no urbanas. Otros estudios examinan las islas de calor de la capa del dosel y las islas de calor de la capa límite. Ambos se examinan sobre la base de mediciones de temperaturas del aire adquiridas con el uso de termómetros. Los SUHI son fuertes tanto de día como de noche debido a las superficies urbanas más cálidas y también dependen de una serie de factores como el clima (particularmente el viento y las nubes), la ubicación geográfica (principalmente el clima y la topografía), la hora del día y la temporada, la forma de la ciudad (materiales, características de la superficie de la ciudad, propiedades térmicas, dimensiones del edificio) y funciones de la ciudad (emisiones en la atmósfera, calor por el uso de energía).

Un gran número de científicos han utilizado la teledetección como una herramienta para el estudio de las islas de calor urbana. La capacidad de los sensores térmicos para registrar la radiación de calor que se origina en varias superficies, ya sea en la atmósfera (por ejemplo, las nubes) o en el suelo, permite la extracción de la temperatura de la superficie, un parámetro que indica directamente el estado térmico de la superficie bajo investigación en el momento de la medición. Cabe mencionar que el tiempo de la medición es un parámetro importante ya que la teledetección proporciona una instantánea del estado del

entorno térmico, que puede considerarse como una representación aceptable del estado general del entorno térmico o como una imagen limitada en el tiempo del ambiente térmico (Abaas, 2020).

Con el advenimiento de la tecnología de teledetección térmica, la observación remota del SUHI se hizo posible. Se han utilizado varias plataformas con sensores térmicos para el mapeo de la magnitud SUHI, esto incluye los satélites NOAA-AVHRR, TIROS, ASTER, MODIS y Landsat. Rao (1972) fue el primero en ilustrar el potencial de la teledetección en el mapeo térmico de las áreas urbanas utilizando datos infrarrojos del satélite TIROS. Inspirado por su trabajo, muchos estudios SUHI se llevaron a cabo utilizando datos térmicos de los primeros satélites en órbita (Bechtel et al., 2019; Carlson, 1986; Carnahan & Larson, 1990; Caselles, López García, Meliá, & Pérez Cueva, 1991; dos Santos et al., 2017; Gallo, Tarpley, McNab, & Karl, 1995; Imhoff, Zhang, Wolfe, & Bounoua, 2010; Meng et al., 2018; Ochola et al., 2020; Price, 1979; Qian, Li, & Nerry, 2013; Shen et al., 2016; Tran, Uchiyama, Ochi, & Yasuoka, 2006; J. Wang, Huang, Fu, & Atkinson, 2015).

El parámetro más popular en el estudio UHI que utiliza la tecnología de detección remota es la temperatura de la superficie terrestre (LST). La temperatura de la superficie terrestre es un parámetro importante en el sistema climático, que afecta el desarrollo de la vegetación, la cubierta de nieve, la escorrentía y los medios de vida humanos (Singh, Kikon, & Verma, 2017). El conocimiento de la dinámica de LST puede usarse además como un indicador de la variabilidad y el cambio climático. LST se mide regularmente desde sensores satelitales en una amplia escala espacial y con una alta resolución temporal. La importancia de LST se reconoce cada vez más y existe un gran interés en desarrollar metodologías para medir LST desde el espacio (Y. Wang et al., 2018). La medición de LST se realiza mediante radiómetros que son sensibles en el dominio de infrarrojos térmicos (generalmente de 8 a 14  $\mu\text{m}$ ). Para la medición de LST se han desarrollado diversos algoritmos; los cuales pueden agruparse en tres categorías, en función del número de bandas térmicas utilizadas: métodos de un solo canal, métodos de varios canales y métodos multiángulo.

Z. Qin, Karnieli, & Berliner (2001) plantearon un método que usa una sola banda térmica, datos de temperatura cerca del suelo y las condiciones atmosféricas del área. Jiménez-Muñoz & Sobrino (2003) propusieron un método generalizado que depende únicamente del contenido de vapor de agua de la atmósfera. M. Wang et al (2016) planteó un mejoramiento al método de Jiménez-Muñoz & Sobrino (2003) al incluir datos correspondientes a fecha y ubicación del área de estudio. M. Wang, Zhang, Hu, & Liu (2019) presentaron un nuevo algoritmo que incluye datos de estaciones meteorológicas y que mejoran la precisión del algoritmo presentado por Jiménez-Muñoz & Sobrino (2003).

Según el estudio realizado por Sobrino et al., (2012) que evalúa el impacto de la resolución espacial en el análisis de la isla de calor superficial, determinan que una resolución menor a 50 m sobrestima la magnitud y no permite distinguir las diferentes zonas dentro de una ciudad. Por otro lado, una resolución mayor a 50 m permite determinar de manera adecuada la magnitud de la isla de calor a nivel de distrito. En la actualidad, los sensores de alta resolución espacial, como Landsat-5, Landsat-7 y Landsat-8 pueden proporcionar imágenes de resolución óptima para tales estudios.

Landsat-5, Landsat-7 y Landsat-8 orbitan a una altitud de 705 Km con una inclinación de 98.2° y recopilan datos en una franja de 185 km. Cada satélite es sincrónico al sol y proporcionan un ciclo de 16 días y 233 órbitas. Las órbitas satelitales de Landsat-7 y Landsat-8 están desplazados, lo que permite una cobertura de repetición cada 8 días (USGS, 2018). Landsat-5 fue lanzado el 1 de marzo de 1984, llevó a bordo los sensores Multispectral Scanner (MSS) y Thematic Mapper (TM). Landsat-5 entregó datos de imágenes de la superficie de la Tierra durante casi 29 años, antes de ser dado de baja el 5 de junio de 2013 (USGS, 2019). Landsat-7 fue lanzado el 15 de abril de 1999 y lleva a bordo el sensor Enhanced Thematic Mapper (ETM+). Desde junio de 2003, el sensor ha adquirido y entregado información con vacíos de datos causados por la falla del SLC (Scan Line Corrector). Finalmente, Landsat-8 se lanzó el 11 de febrero de 2013 y lleva a bordo los sensores Operational Land Imager (OLI) y Thermal Infrared Sensor (TIRS).



Los datos de resolución fina de Landsat se han utilizado ampliamente para estudiar los paisajes térmicos urbanos en Kuala Lumpur en Malasia (Amanollahi, Tzanis, Ramli, & Abdullah, 2016); en el Estado de Espíritu Santo y Río de Janeiro en Brasil (dos Santos et al., 2017; Peres et al., 2018); en los diferentes estados de Norte América (Imhoff et al., 2010); en Beijing y la ciudad de Wuhan en China (Meng et al., 2018; Shen et al., 2016); en Abuja capital de Nigeria (Adeyeri et al., 2017); en la ciudad de Noida y Nueva Delhi en India (Kikon, Singh, Singh, & Vyas, 2016; Yadav et al., 2017); en ciudades de África con un rápido crecimiento poblacional perteneciente a países como Nigeria, Kenia, Etiopía y Zambia (Simwanda et al., 2019); en la ciudad de Valencia y Madrid en España (Lehoczy, Sobrino, Skoković, & Aguilar, 2017; Rasilla, Allende, Martilli, & Fernández, 2019); en la ciudad de Londres en Inglaterra (B. Zhou et al., 2016); en ciudad de México en México (Ballinas & Barradas, 2016); en la ciudad de Rosario en Argentina (Vega et al., 2019); en la ciudad de Valparaíso en Chile (Carrasco et al., 2017); en la ciudad de San Carlos en Venezuela (Gil, 2018); en Bogotá capital de Colombia (Ramírez-Aguilar & Lucas Souza, 2019); en las áreas metropolitanas de Huancayo y Arequipa en Perú (Miguel et al., 2019).

Como se expresó en las citas anteriores, varios países de diferentes continentes han realizados estudios de suma importancia para la correcta caracterización de las islas de calor urbano, esto a través de datos provenientes de imágenes satelitales. En la actualidad, en nuestro país aún no se han generado los suficientes estudios que permitan solventar las dudas referentes al comportamiento y distribución de las islas de calor urbano. Son pocas las ciudades que cuentan con estudios o investigaciones acerca de dicho fenómeno. A continuación, se describen los exiguos estudios realizados en Ecuador que abarcan la temática de análisis.

Baño, Salazar, & Delgado (2018) utilizaron imágenes satelitales provenientes de Landsat-7 para caracterizar la isla de calor urbano en el Distrito Metropolitano de Quito. Informan que a través de la determinación de la distribución espacial y temporal de la temperatura superficial terrestre se identificó que este fenómeno está presente en seis parroquias del Distrito Metropolitano de Quito, tres urbanas y tres rurales. Adicionalmente, los autores concluyen que el índice de Vegetación Normalizada (NDVI) presenta una correlación negativa con la temperatura superficial terrestre, lo que se traduce en que, a medida que se eliminan las áreas verdes la temperatura tiende a aumentar.

Jami Aymacaña et al. (2018) analizaron la presencia y distribución de las islas de calor urbano en el cantón Rumiñahui a través de datos proporcionados por el satélite Landsat-7. Los autores indican que existe la presencia de islas de calor en los sectores de Sangolquí y San Rafael tanto en el año 2001 como en el 2016. Adicionalmente, los autores expresan que las variables biofísicas tales como el NDVI y NDWI muestran una correlación negativa con respecto a la temperatura superficial.

Palme et al. (2016) exploró el tema del efecto de isla de calor urbano en la ciudad de Guayaquil mediante el uso de técnicas GIS, 8 sectores de la ciudad se parametrizan para ser insertados en una simulación climática urbana. Los resultados de la simulación muestran que Guayaquil presenta un efecto UHI de 3-4° C durante las tardes y noches. Adicionalmente, mencionan que al mediodía algunos sectores podrían tener temperaturas más altas que otros, pero en general, solo hay pequeñas diferencias en el UHI obtenido en toda la ciudad. Los autores proponen que los resultados obtenidos en la investigación deben ser corroborados y contrastados técnicas de teledetección para estimar de manera apropiada la intensidad de UHI en Guayaquil.

De forma más específica y acorde a nuestra área de interés, los estudios realizados en la ciudad de Cuenca son muy reducidos, por tal razón, aún no existe una base consolidada para poder efectuar comparaciones y discusiones representativas acerca de las islas de calor. La ciudad de Cuenca presenta una de las densidades poblacionales más altas del país y paralelamente su desarrollo industrial es uno de los más fuertes de la región y sin embargo, los estudios que tratan el fenómeno UHI son escasos. A continuación, se presentan los estudios bibliográficos que se han logrado rescatar sobre la temática tratada.

El estudio realizado por Guillén (2016) es uno de los precursores en el ámbito de la climatología urbana y más específicamente en el fenómeno isla de calor urbano. El autor realiza un acercamiento al UHI a través de la comparación de datos meteorológicos ubicados tanto en el área urbana como en el área rural para el año 2014. El autor concluye que las áreas más urbanizadas son aquellas que presentan las temperaturas más elevadas durante la noche y que la temperatura superficial terrestre supera la temperatura ambiente en las áreas periféricas con una diferencia que fluctúa entre 5 y 15° C y entre 2 a 13.5 °C en el núcleo de la ciudad. También menciona que al interior del límite urbano se generan 4 zonas climáticas con características particulares, cuya variación térmica superficial entre dichas zonas es de apropiadamente 5°C. Adicionalmente, el autor menciona que la ciudad de Cuenca aún está a tiempo de planificar medidas mitigadoras para controlar los efectos del UHI.

Campoverde (2018) analiza el fenómeno UHI, en la ciudad de Cuenca, a través del contraste de datos térmicos obtenidos de estaciones meteorológicas ubicadas en áreas urbanas y rurales para el periodo comprendido entre el año 2015 y 2017. El autor en base a las estaciones de monitoreo concluye que el centro de máxima intensidad se da en la zona urbana consolidada alrededor de la estación de El Vecino, y alcanza una diferencia de 3,24 °C respecto a la estación más fría de Quingeo. El segundo foco de calor inmediato se da con la estación de Yanuncay CTS que alcanza una diferencia térmica de 2,82 °C respecto a Quingeo. El autor expresa que las zonas con mayor intensidad de UHI presenta las siguientes características: se distribuye en la zona central urbanizada y con menor altitud, tiene un eje este-oeste, y manifiesta mayor valor en la época seca. Adicionalmente, el autor refuerza lo que ha se ha venido mencionando en secciones anteriores y que corresponde a los ínfimos trabajos que analizan el UHI en la región Sierra; destacando que su investigación es pionera a nivel local en el estudio de dicho fenómeno.

Los dos estudios, realizados en la ciudad de Cuenca, comentados en los párrafos anteriores son las únicas referencias bibliográficas con las cuales se pueden comparar los resultados obtenidos en la presente investigación. No obstante, es menester hacer hincapié en que tales estudios analizan la isla de calor desde estaciones meteorológicas y no desde el ámbito de la teledetección. Este estudio pretende formar parte de la base de los futuros estudios climatológicos urbanos relacionados con el UHI en la ciudad de Cuenca.

## 5. METODOLOGÍA

### 5.1 Generalidades

En toda investigación científica, es menester, que los hechos estudiados, así como las relaciones que se establecen entre estos, los resultados alcanzados y las evidencias significativas encontradas en relación con el problema investigado, presenten características de fiabilidad, objetividad y validez interna; para lo cual, es necesario definir los procedimientos de orden metodológico, a través de los cuales se intenta dar respuestas a las interrogantes objeto de indagación (Balestrini, 2008).

En consecuencia, el Marco Metodológico, de la presente investigación donde se propone estudiar el Fenómeno Isla de Calor Urbano Superficial en la ciudad de Cuenca, durante el periodo 2013-2017; es la instancia en donde es fundamental delimitar el conjunto de métodos, técnicas y protocolos instrumentales que se emplearán en el proceso de recolección de los datos requeridos para la investigación propuesta.

En función de las características derivadas del problema investigado y de los objetivos planteados al inicio de la misma, en el Marco Metodológico del presente estudio, se indican los procedimientos más pertinentes para recopilar, presentar y analizar los datos, con la finalidad de cumplir con el propósito general de la investigación planteada. En tal sentido, se desarrollarán importantes aspectos relativos al tipo de estudio y a su diseño de investigación, que en este caso, se trata de una investigación exploratoria; el área de estudio, así como, las técnicas e instrumentos que se emplearán en la recolección de los datos y las características principales de los mismos; las formas de codificación; representación de los datos; y el análisis e interpretación de los resultados permitirá destacar las evidencias más trascendentales encontradas en relación al estudio del Fenómeno Isla de Calor Urbano Superficial.

Para representar la metodología de forma oportuna, esta se ha dividido en varias secciones, en las cuales se describe el área de estudio, las fuentes y formas de recopilación de la información necesaria para el análisis de datos, los algoritmos utilizados para el procesamiento de las imágenes satelitales, los algoritmos empleados para recuperar las variables de estudio y la forma de validación de los resultados obtenidos.

### 5.2 Área de estudio

El área de estudio abarca la zona urbana de la ciudad de Cuenca y su periferia inmediata, los cuales se encuentran localizados en el cantón de Cuenca, provincia del Azuay, ubicadas en la región seis de la república del Ecuador. La ciudad de Cuenca cuenta con una superficie de 73 km<sup>2</sup> que en relación con el cantón representa el 2.34 % del suelo y su periferia con 114 km<sup>2</sup>. La ciudad se sitúa en la zona centro sur del país, con latitud de 2°53,12" S y longitud de 79°09 W, ubicada en el callejón interandino de la Cordillera de los Andes a una altitud de 2530 m.s.n.m.

Para el año 2018, el cantón Cuenca presenta una población estimada de 614.539 habitantes, de los cuales el área urbana cuenta con 403.410 habitantes, es decir, el 65.64 % de la población del cantón reside en el área urbana (SENPLADES, 2018), este aumento ha generado un notable cambio en la superficie del suelo, pues se ha reducido las áreas permeables (cobertura vegetal) y se han incrementado las áreas impermeables (infraestructura civil).

La ciudad de Cuenca, al situarse dentro del callejón interandino, puede estar influenciado por la Costa o el Oriente, sin embargo, esto va a estar en función del lugar donde descarguen los sistemas hidrográficos, que en este caso es hacia el Oriente por lo que el clima presentará mayores variaciones térmicas y estabilidad en la humedad atmosférica (Cordero & Guillén, 2013).

De acuerdo con la clasificación de Köppen-Geiger, la ciudad de Cuenca se clasifica como Cfb el cual concierne a un clima de latitudes medias, húmedo y templado (Kottek, Grieser, Beck, Rudolf, & Rubel, 2006). En detalle, la temperatura promedio es de 16.3 °C. Los meses con mayor temperatura

corresponden a noviembre, diciembre, enero y febrero, mientras que los meses de menor temperatura se presentan en el periodo comprendido entre junio y septiembre. La variación térmica anual es de 2.7 °C, mientras que la amplitud térmica diaria promedio es de 9.2 °C. La humedad relativa promedio alcanza un porcentaje igual al 64.9% y no presenta variaciones significativas en el transcurso del año. El viento predominante posee una dirección de noreste a suroeste con una velocidad que oscila entre los 9 y 12.82 Km/h. La nubosidad que presenta la ciudad corresponde al rango entre 6 y 7 octas, con mayor nubosidad en los meses de febrero a mayo. A pesar de presenta valores altos de nubosidad, la radiación solar es constante a lo largo de todo el año, presentando valores promedios entre 3.92 y 5.06 KWh/m<sup>2</sup>; en los meses de noviembre y diciembre se exhibe la mayor radiación solar, mientras que la menor se da en el mes de junio (Cordero & Guillén, 2013; Guillén, 2016).

La ciudad presenta cuatro ríos: Tomebamba, Yanuncay, Tarqui y Machángara, los cuales al unirse forman el río Cuenca, afluente del río Paute, que fluye hacia el Oriente.

En la [Ilustración 5](#) se puede visualizar la ciudad de cuenca junto con su periferia inmediata, objetos de estudio del presente trabajo de investigación.

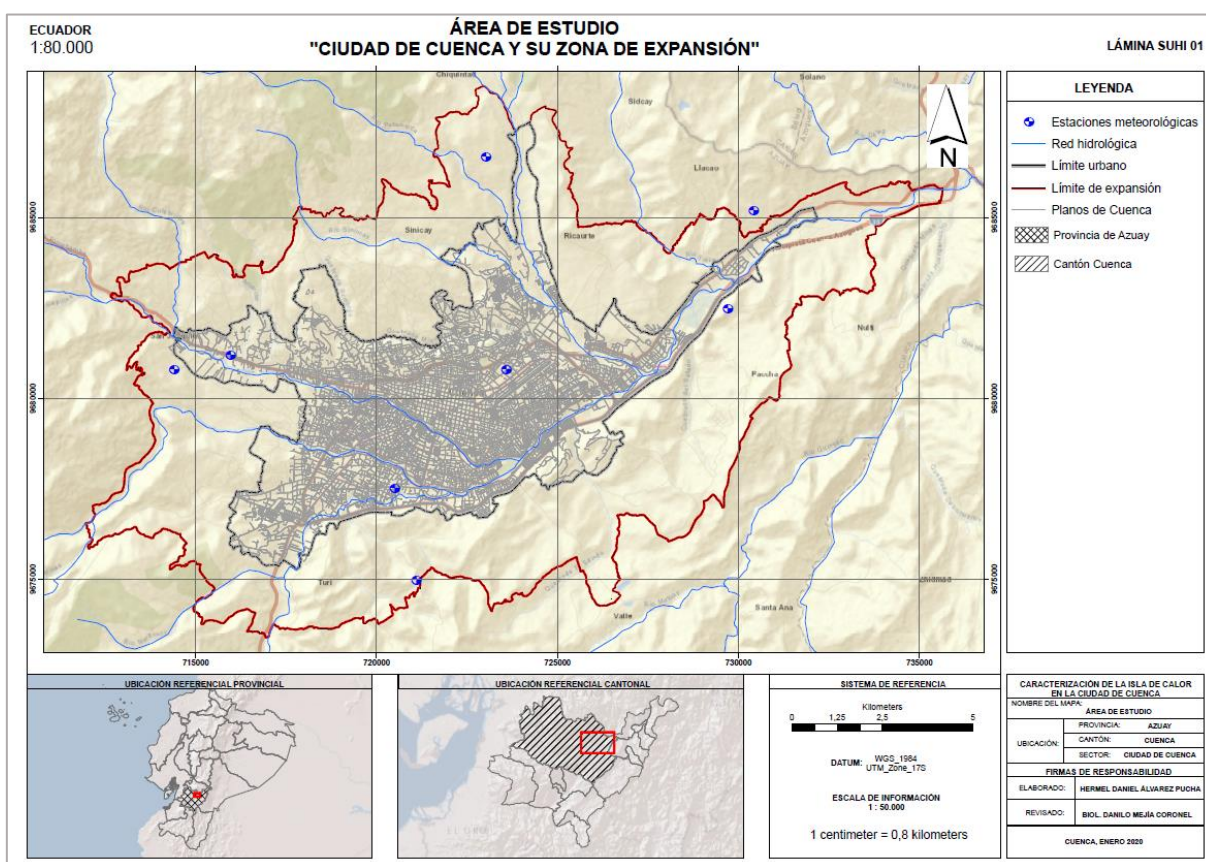


Ilustración 5. Mapa de ubicación del área de estudio  
Elaborado por: Autor, 2020

### 5.3 Adquisición de imágenes satelitales

Para evaluar el fenómeno Isla de Calor Urbano Superficial se utilizaron un conjunto de imágenes satelitales pertenecientes al proyecto Landsat, desarrollado por la Agencia de Servicios Geológicos de los Estados Unidos (USGS) en colaboración con la NASA, y disponibles de forma gratuita a través de su plataforma web <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Las imágenes seleccionadas, de nivel 1, se adquirieron en formato GeoTIFF, con row 62 y path 10, entre el periodo comprendido 2013-2017. Todas las imágenes utilizadas en la presente investigación fueron rectificadas al Datum WGS 84 (World Geodetic System 1984) y sistemas de coordenadas UTM (Universal Transverse Mercator) Zona 17 Sur, además, han sido remuestreadas a un tamaño de píxel de 30 m mediante interpolación por el método de

convolución cúbica. Las fechas de las imágenes seleccionadas para la presente investigación, así como también, el porcentaje de nubosidad y código se indican en Tabla 3.

Tabla 3. Información sobre las imágenes adquiridas

Sensor	Código	Fecha	Tiempo (GTM)	Periodo	Nubosidad área estudio
L8-OLI/TIRS	LC80100622013332LGN01	2013-11-28	15:28:43	Seco	0%
L8-OLI/TIRS	LC80100622014303LGN01	2014-10-30	15:27:15	Seco	0%
L8-OLI/TIRS	LC80100622015306LGN01	2015-11-02	15:27:12	Seco	5%
L8-OLI/TIRS	LC80100622016325LGN01	2016-11-20	15:27:26	Seco	0%
L8-OLI/TIRS	LC80100622017263LGN00	2017-09-20	15:27:15	Seco	5%

Elaborado por: Autor, 2020

#### 5.4 Procesamiento de imágenes satelitales

Los datos Landsat se han vuelto extremadamente integrados en las aplicaciones de observación y monitoreo de la Tierra, sin embargo, antes de que estos datos puedan usarse para ciertos análisis ambientales, deben ser preprocesados para tener en cuenta los efectos solares, atmosféricos, topográficos e incluso los propio del sensor (Young et al., 2017), estos pasos de preprocesamiento pueden afectar significativamente los resultados obtenidos. Es menester, antes de procesar las imágenes Landsat, entender las unidades frecuentemente asociadas con estos datos: para las bandas visibles a SWIR tenemos número digital (ND), radiancia y reflectancia; en cambio, para las bandas térmicas tenemos ND, radiancia y temperatura. Los productos Landsat nivel 1 se entregan como números digitales, que se pueden convertir en unidades absolutas de radiancia o reflectancia. El procesamiento de estas unidades específicas, junto con las correcciones radiométricas respectivas, siguen el flujo de trabajo presentado en la [Ilustración 6](#).

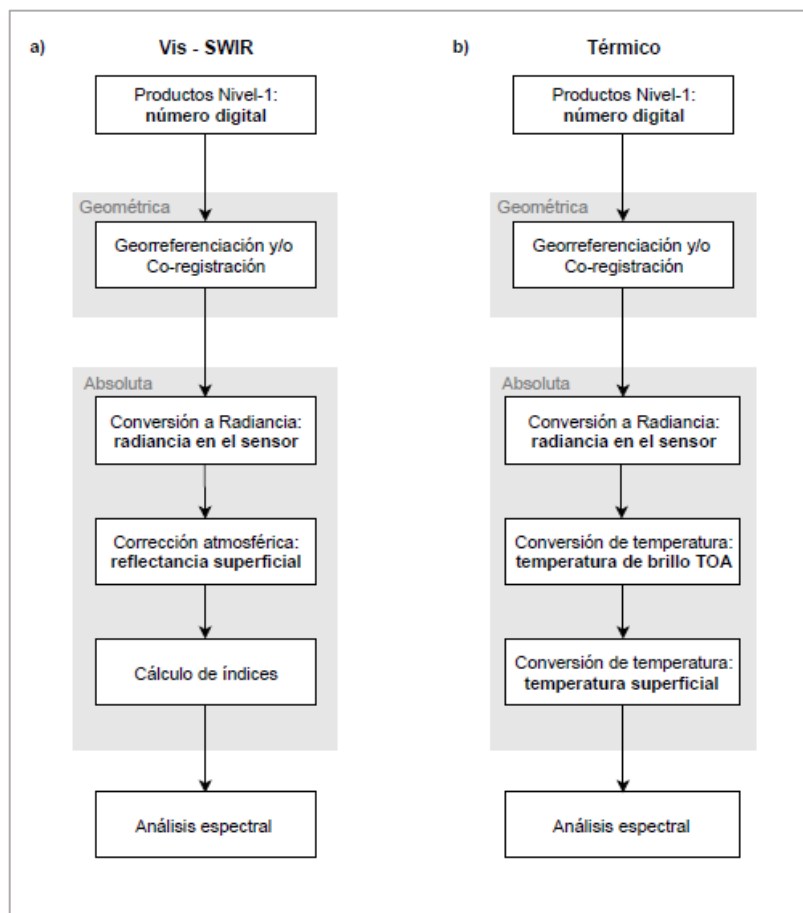


Ilustración 6. Flujo de trabajo para el procesamiento de las imágenes satelitales.

Elaborado por: Autor, 2020



### 5.4.1 Corrección Geométrica

El proceso de georreferenciación (alineación de las imágenes a su ubicación geográfica correcta) y la ortorrectificación (corrección de los efectos del relieve y la dirección de la vista en la ubicación del pixel) son componentes de corrección geométrica necesarios para garantizar el posicionamiento exacto de una imagen.

Aunque las imágenes Landsat nivel 1 son productos corregidos con puntos de control y modelos digitales de elevación y se pueden utilizar tal como se las entrega, siempre que se trabajen con series históricas o imágenes antiguas es necesario realizar el proceso de georreferenciación para asegurar el posicionamiento correspondiente de los pixeles (Chang, 2018).

La corrección geométrica se realizó con el software de código abierto QGIS 3.10 utilizando el complemento *Georreferenciador*. Como mapa base para el proceso de georreferenciación se utilizó una ortofoto, de la ciudad de Cuenca y su periferia inmediata, con un tamaño de pixel de 0.6 m. Se seleccionaron 25 puntos de control distribuidos uniformemente para cada escena para generar imágenes georreferenciadas.

### 5.4.2 Corrección radiométrica absoluta

La corrección radiométrica absoluta hace referencia al conjunto de pasos de preprocesamiento que tienen en cuenta los efectos del sensor, solares, atmosféricos y topográficos. Los valores obtenidos a través de la corrección absoluta pueden ser comparados con otras imágenes que han tenido el mismo nivel de corrección (Young et al., 2017).

#### 5.4.2.1 Conversión de ND a Radiancia

La conversión a radiancia es el paso de preprocesamiento mediante el cual los Números Digitales (ND) se vuelven a convertir en radiancia, mediante el uso de coeficientes de calibración asociados a cada una de las bandas de un determinado sensor; esto debido a que los ND no pueden usarse para comparar valores espectrales a lo largo del tiempo debido a la degradación del sensor y las diferencias existentes entre sensores. Los coeficientes de calibración se encuentran almacenados en el archivo de metadatos de cada imagen seleccionada.

Para la conversión de números digitales a radiancia de las imágenes Landsat-8, se aplicó el algoritmo presentado en la ecuación 3 (USGS, 2019):

$$L_{\lambda} = ML * Q_{cal} + A_L \quad (3)$$

Donde:

$L_{\lambda}$  = Radiancia espectral en lo alto de la atmósfera ( $W/(m^2 * sr * \mu m)$ )

ML = Factor radiancia de escala multiplicativa para cada banda (obtenido de los metadatos)

$A_L$  = Factor radiancia de escala aditiva para cada banda (obtenido de los metadatos)

$Q_{cal}$  = Valor de pixel en números digitales

La conversión de ND a radiancia se realizó con el software de código abierto QGIS 3.10 utilizando el complemento *Calculadora Raster*.

#### 5.4.2.2 Corrección atmosférica

En la teledetección, la radiación de la superficie de la Tierra experimenta una interacción significativa con la atmósfera antes de que llegue a los sensores de teledetección. Por lo tanto, la radiación medida generalmente contiene al menos dos tipos de energía: parte de la radiación medida del reflejo del objetivo de interés y el remanente de la propia atmósfera (Jian Guo Liu, 2016). Debido a los efectos

atmosféricos como la atenuación y dispersión de nubes y partículas de aerosoles, la radiación medida dentro de estas escenas contiene ruido atmosférico, lo que a su vez afecta la precisión de interpretación de los objetivos terrestres, especialmente en la teledetección visible e infrarroja cercana.

Para la corrección atmosférica de las imágenes satelitales evaluadas, se utilizó el método Fast Line-of-Sight Atmospheric Analysis of Hypercube (FLAASH). FLAASH comienza a partir de una ecuación estándar para la radiación espectral en un píxel del sensor, que se aplica al rango de longitud de onda solar (se omite la emisión térmica) y materiales planos Lambertianos o sus equivalentes. La ecuación es la siguiente (Kaufman et al., 1997):

$$L = \left( \frac{A * \rho}{1 - S * \rho_e} \right) + \left( \frac{B * \rho_e}{1 - S * \rho_e} \right) + L_a \quad (4)$$

Donde:

$\rho$  = Reflectancia superficial del píxel

$\rho_e$  = Reflectancia superficial promedio para el píxel y la región alrededor

$S$  = Albedo de la atmósfera

$L_a$  = Radiancia dispersada por la atmósfera

$A$  y  $B$  = Coeficientes geométricos y atmosféricos dependientes de la atmósfera

El método FLAASH se lo llevo a cabo en el software ENVI 5.3 usando como características una atmósfera estándar, aerosol de sectores urbanos e interpolación de parámetros atmosféricos por píxel para una profundidad óptica de 550 nm.

#### 5.4.2.3 Cálculo de índices físicos

Los índices físicos son combinaciones paramétricas simples de varios canales espectrales. Están diseñados para reforzar la sensibilidad a fenómenos biofísicos particulares, como la vegetación, el contenido de agua, el brillo del suelo, entre otros (Camps-Valls, Tuia, Gómez-Chova, Jiménez, & Malo, 2011).

Para el presente estudio, se han establecido la ejecución de tres índices físicos: NDVI (Índice de Vegetación Normalizada), SAVI (Índice de Vegetación Ajustado por el Suelo) y NDBI (Índice de Edificación Normalizada). Estos índices han sido seleccionados por su gran representatividad en los estudios correspondientes a islas de calor urbano.

Para la obtención del NDVI (adimensional) se utilizó la siguiente expresión matemática (Tucker, 1979):

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (5)$$

Donde:

$NIR$  = Reflectancia en la banda del infrarrojo cercano

$R$  = Reflectancia en la banda del rojo

Para la obtención del SAVI (adimensional) se utilizó el siguiente algoritmo matemático (Huete, 1988):

$$SAVI = \frac{(1+L)(NIR - R)}{(NIR + R + L)} \quad (6)$$



Donde:

NIR = Reflectancia en la banda del infrarrojo cercano

R = Reflectancia en la banda del rojo

L = Constante del suelo que generalmente adquiere el valor de 0.5

Para la obtención del NDBI (adimensional) se utilizó la siguiente expresión matemática (Zha, Gao, & Ni, 2003):

$$NDBI = \frac{SWIR - NIR}{SWIR + NIR} \quad (7)$$

Donde:

SWIR = Reflectancia en la banda del infrarrojo corto (1.57-1.65  $\mu\text{m}$ )

NIR = Reflectancia en la banda del infrarrojo cercano

Todos los índices mencionados en este acápite, han sido desarrollados con el software de código abierto QGIS 3.10 utilizando el complemento *Calculadora Raster*.

#### 5.4.2.4 Conversión a temperatura de brillo

Los datos TIRS también se pueden convertir de radiación espectral (como se describió en la sección 5.4.2.1) a la temperatura de brillo ( $T_b$ ), que es la temperatura efectiva vista por el satélite bajo un supuesto de emisividad unitaria. Para la obtención de la temperatura de brillo se utilizó la siguiente expresión matemática (USGS, 2019):

$$T_b = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda}\right) + 1} \quad (8)$$

Donde:

$T_b$  = Temperatura de brillo en lo alto de la atmósfera (K)

$L_\lambda$  = Radiancia espectral en lo alto de la atmósfera ( $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$ )

$K_1$  = Constante térmica uno (obtenida de los metadatos)

$K_2$  = Constante térmica dos (obtenida de los metadatos)

La temperatura de brillo se calculó con el software de código abierto QGIS 3.10 utilizando el complemento *Calculadora Raster*.

#### 5.4.2.5 Cálculo de la temperatura superficial terrestre (LST)

Antes de iniciar con la metodología de derivación del LST, es menester considerar y tener presente que el sensor infrarrojo térmico (TIRS) a bordo del Landsat-8 tiene dos canales térmicos espectralmente adyacentes, tanto el método de un solo canal como los métodos de varios canales pueden emplearse para el cálculo del LST (Meng et al., 2018). Sin embargo, la banda 11 de Landsat-8 tiene un grave error de calibración radiométrica inducido por el efecto stray light (Montanaro, Gerace, Lunsford, & Reuter, 2014). Así, el método de un solo canal se vuelve el más representativo y se recomienda para la recuperación de LST utilizando la banda 10 de Landsat-8 (Barsi et al., 2014).

Para la obtención de la temperatura superficial, se siguieron los lineamientos establecidos por M. Wang et al. (2016); el cual propone un mejoramiento al método de un solo canal desarrollado por Jiménez-

Muñoz & Sobrino (2003), al incorporar parámetros funcionales relacionadas con la atmósfera, la latitud de la zona de estudio y la fecha de adquisición de las imágenes satelitales. A continuación, se presetan las ecuaciones que se requieren para el cálculo del LST:

$$T_s = \{(1 - \varepsilon\tau) L_\lambda - [1 + (1 - \varepsilon) \psi] \varphi\}(\varepsilon\tau\gamma)^{-1} + T_b \quad (9)$$

Donde:

$T_s$  = Temperatura superficial terrestre (K)

$T_b$  = Temperatura de brillo en el sensor (K)

$L_\lambda$  = Radiancia espectral en lo alto de la atmósfera ( $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$ )

$\varepsilon$  = Emisividad de la superficie del suelo

$\psi$  = Constante térmica en función de la temperatura de brillo

$\varphi, \psi, \tau$  = Constantes atmosféricas en función de la cantidad de vapor de agua

Para derivar el LST de la ecuación (9) se deben conocer seis parámetros, incluido la emisividad de la superficie terrestre (LSE,  $\varepsilon$ ), la radiancia en el sensor ( $L_\lambda$ ), la temperatura de brillo en el sensor ( $T_b$ ) y las tres constantes atmosféricas ( $\tau, \psi$  y  $\varphi$ ). El parámetro  $\varepsilon$  se calculó utilizando el método de recuperación de LSE de umbrales de NDVI dado José A. Sobrino et al. (2008).  $L_\lambda$  y  $T_b$  se calcularon directamente a partir de los datos de infrarrojos térmicos del satélite Landsat-8 y siguiendo los algoritmos indicados en las secciones 5.4.2.1 y 5.4.2.4 respectivamente. A continuación, se proporcionan las expresiones matemáticas para obtener las tres constantes atmosféricas.

$$\varphi = \varphi_b + r_l \Delta\varphi_l + r_t \Delta\varphi_t \quad (10)$$

Donde:

$\varphi_b$  = Cantidad base de  $\varphi$

$r_l$  = Coeficiente de interpolación basado en la latitud

$\Delta\varphi_l$  = Variación de  $\varphi$  entre latitud de  $0^\circ$  y  $90^\circ$

$r_t$  = Coeficiente de interpolación basado en el mes de adquisición de la imagen satelital

$\Delta\varphi_t$  = Variación de  $\varphi$  entre atmósferas de verano e invierno

Los términos  $r_l$  y  $r_t$  fueron calculados a partir de datos de latitud y los meses de adquisición de las imágenes, usando las siguientes fórmula:

$$r_l = \text{abs}(\text{lat})/90 \quad (11)$$

$$r_t = \text{dif}(\text{mon}, \text{mon}_s)/6 \quad (12)$$

Donde:

$\text{lat}$  = latitud del centro de la imagen Landsat

$\text{mon}$  = mes de adquisición de la imagen Landsat

$\text{mon}_s$  = mes medio de verano en el área local (1 para el hemisferio sur)

$\text{abs}(\text{lat})$  = valor absoluto de  $\text{lat}$

$\text{dif}(\text{mon}, \text{mon}_s)$  = valor absoluto de la diferencia mensual entre  $\text{mon}$  y  $\text{mon}_s$

Los factores atmosféricos ( $\Delta\phi_l, \Delta\phi_t, \phi_b, \psi, \tau$ ) pueden ser recuperados a partir de la siguiente matriz, la cual depende únicamente del contenido de vapor de agua (M. Wang et al., 2016):

$$\begin{bmatrix} \tau \\ \psi \\ \phi_b \\ \Delta\phi_l \\ \Delta\phi_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w^2 \\ w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Los coeficiente  $c_{ij}$  referidos en la ecuación (13) fueron simulados en MODTRAN 4.0 para la banda 10 de Landsat-8, utilizando una base de datos TIGR (Thermodynamic Initial Guess Retrieval) mediante regresiones estadísticas, así, la matriz de coeficientes puede quedar expresada de la siguiente manera (M. Wang et al., 2016):

$$C_{L8-B10} = \begin{bmatrix} -0.0027 & -0.0978 & 0.9949 \\ 0.0404 & -0.4839 & 2.0436 \\ -0.0389 & 1.2263 & -0.4706 \\ 0.1709 & -0.9762 & 0.5466 \\ 0.0219 & -0.1080 & 0.0741 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Para el cálculo de la constante térmica en función de la temperatura de brillo ( $\gamma$ ) se usa la siguiente expresión matemática (M. Wang et al., 2016):

$$\gamma = aT_b + b \quad (15)$$

Donde:

$T_b$  =Temperatura de brillo en el sensor (K)

$a = 0.001190$

$b = -0.21298$

Las constantes a y b se obtienen a partir de la regresión lineal entre la temperatura de brillo y la temperatura normal en un rango de 262 y 343 K y son específicas para el satélite Landsat-8.

### **Cálculo de la emisividad de la superficie del suelo**

Para el cálculo de la emisividad de suelo se utilizó la metodología propuesta por José A. Sobrino et al. (2008), la cual usa ciertos valores de NDVI para distinguir entre los píxeles del suelo ( $NDVI < NDVI_s$ ) y los píxeles de vegetación completa ( $NDVI > NDVI_v$ ). Para aquellos píxeles compuestos de suelo y vegetación (píxeles mixtos,  $NDVI_s \leq NDVI \leq NDVI_v$ ), el método utiliza la siguiente ecuación simplificada:

$$\varepsilon_\lambda = \varepsilon_{v\lambda} P_v + \varepsilon_{s\lambda} (1 - P_v) + C_\lambda \quad (16)$$

Donde:

$\varepsilon_{v\lambda}$  y  $\varepsilon_{s\lambda}$  = emisividad de la vegetación y el suelo respectivamente

$P_v$  = fracción de cubierta vegetal

$C_\lambda$  = constante del efecto de cavidad ( $C=0$  para superficies planas)

El término  $P_v$  puede ser derivado a través del índice NDVI usando la siguiente expresión matemática.

$$P_v = \left( \frac{NDVI - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s} \right)^2 \quad (17)$$

En áreas particulares, los valores de  $NDVI_v$  y  $NDVI_s$  se pueden extraer del histograma del NDVI. Los autores propusieron valores de  $NDVI_v = 0.5$  y  $NDVI_s = 0.2$  para aplicar el método en condiciones globales. Para obtener valores consistentes se ajustó el NDVI a un valor de 0.2 para todos los píxeles con  $NDVI < 0.2$  y a 0.5 para todos los píxeles con  $NDVI > 0.5$ .

Así, la emisividad de la superficie (LSE,  $\epsilon$ ) puede ser recuperada usando las siguientes ecuaciones (José A. Sobrino et al., 2008):

$$\epsilon_\lambda = \begin{cases} \text{para } NDVI \leq 0.2: LSE_s = 0.98 - 0.042 * R \\ \text{para } 0.2 < NDVI < 0.5: LSE_{mix} = 0.971(1 - P_v) + 0.987 * P_v \\ \text{para } NDVI \geq 0.5: LSE_v = 0.99 \end{cases} \quad (18)$$

Donde:

$R$  = reflectancia de la banda roja

$LSE_s$  = emisividad del suelo

$LSE_v$  = emisividad de la vegetación

$LSE_{mix}$  = emisividad mixta (píxeles con valores de suelo y vegetación)

#### **Cálculo del contenido de vapor de agua**

Para el cálculo del parámetro más importantes, contenido de vapor de agua, que se necesita para la recuperación de LST se utilizó el algoritmo propuesto Buck (1981):

$$w = 0.098 * RH * (1.0007 + 3.46 * 10^{-6} * P) * 6.1121 * \exp\left(\frac{15.502 T_0}{240.97 + T_0}\right) \quad (19)$$

Donde:

$w$  = contenido de vapor de agua ( $\text{g}/\text{cm}^2$ )

$RH$  = humedad relativa

$P$  = presión del aire (hPa)

$T_0$  = Temperatura del aire ( $^{\circ}\text{C}$ )

Los valores de las variables meteorológicas inmersas dentro de la ecuación (19) han sido obtenidas a partir de la red de monitoreo en dominio de La Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca en conjunto con el Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER) en el periodo de estudio comprendido entre 2013-2017. Los datos utilizados se seleccionaron en función de la fecha de adquisición de las imágenes satelitales.

Todos los algoritmos matemáticos presentados en la sección 5.4.2.5 se calcularon con el software de código abierto QGIS 3.10 utilizando la herramienta *Calculadora Raster*.

## 5.5 Análisis de datos

### 5.5.1 Análisis estadístico

Para comparar la influencia de las áreas verdes y las zonas impermeables en el efecto SUHI, la correlación de Pearson entre el NDVI, SAVI, NDBI y LST se calculó de acuerdo a la ecuación (20).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}) \times (Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (20)$$

Donde:

$r$  = coeficiente de correlación de Pearson

$X_i$  = valores medidos de la variable X

$Y_i$  = valores medidos de la variable Y

La fuerza del coeficiente de correlación fue evaluado en base al guía que Evans (1996) propuso para el valor absolutos de  $r$ :

Tabla 4. Fuerza de correlación

ID	Rango	Significado
1	0.00 – 0.19	Muy débil
2	0.20 – 0.30	Débil
3	0.40 – 0.59	Moderado
4	0.60 – 0.79	Fuerte
5	0.80 - 1	Muy fuerte

Fuente: (Evans, 1996)

Para el desarrollo del coeficiente de Pearson se utilizó el IDE (Entorno de Desarrollo Integrado) Spyder 4.0 que viene escrito en lenguaje de programación Python 3.7 dentro del programa Anaconda, el cual es un software de código abierto.

### 5.5.2 Índice de evaluación ecológica

El índice de variación del campo térmico urbano (por su siglas en inglés UTFVI) se utilizó para evaluar el efecto del SUHI considerando aspectos ecológicos de acuerdo con la metodología propuesta por Zhang et al. (2006). El UTFVI puede ser calculado usando la ecuación (21).

El UTFVI es un índice que nos permite identificar cuantitativamente el efecto SUHI y los divide en seis categorías en línea con seis índices de evaluación ecológica específicos. Así, el UTFVI tiene la capacidad de indicar el estado térmico de un área determinada y asignarle una categoría de conformidad o no conformidad en función del gradiente térmico presentado. Los valores límites para el índice de evaluación ecológica relacionado con el UTFVI se presentan en la Tabla 5.

$$\text{UTFVI} = \frac{T_s - T_{\text{mean}}}{T_{\text{mean}}} \quad (21)$$

Donde:

UTFVI = índice de variación del campo térmico urbano (adimensional)

$T_s$  = LST (K)

$T_{\text{mean}}$  = promedio de LST (K)

El índice térmico ha sido desarrollado con el software de código abierto QGIS 3.10 utilizando el complemento *Calculadora Raster*.

Tabla 5. Valores umbrales para el índice de evaluación ecológica

UTFVI	UHI	Índice de evaluación ecológica
<0	Ninguno	Excelente
0-0.005	Débil	Bueno
0.005-0.010	Medio	Normal
0.010-0.015	Fuerte	Malo
0.015-0.020	Muy fuerte	Muy malo
>0.020	Súper fuerte	Pésimo

Fuente: (Zhang et al., 2006)

### 5.5.3 Caracterización del SUHI

Para caracterizar el efecto SUHI en la ciudad de Cuenca y su zona de expansión se utilizaron las capas ráster, generadas para cada año de estudio, correspondientes al índice térmico UTFVI. A las capas se le asignaron un valor de celda de 0 a 6 según el estado del área determinada por el índice de evaluación ecológica; los valores bajo denotan zonas inhóspitas y con fuerte presencia del efecto UHI y los valores altos indican zonas acogedoras y sin la presencia del efecto UHI. Posteriormente, las capas ráster reclasificadas para el periodo de análisis 2013-2017 se sumaron a través de operaciones aritméticas ráster en QGIS 3.10. Los valores resultantes de la capa ráster de salida se sitúan entre 0 y 30, donde los valores de píxeles más bajos indican áreas caracterizadas por poseer elevadas temperaturas superficiales, mientras que los valores de píxeles más altos representan temperaturas superficiales bajas. Las áreas relacionadas con un UHI súper fuerte y con un índice de evaluación ecológica pésimo presentan un valor de pixel igual a 0 (es decir, las áreas con un valor de celda igual a cero en las 5 capas) obtienen un valor de pixel igual a 0 en la capa resultante, por lo tanto, pueden identificarse como UHI persistentes en la ciudad de Cuenca. Finalmente, el mapa UHI de caracterización de las áreas de la ciudad de Cuenca con y sin UHI se generó extrayendo los píxeles con valores 0.

Adicionalmente, y para mejorar la comprensión de cuáles son los lugares dentro de la ciudad de Cuenca que se encuentran expuestos al efecto UHI, se utilizaron herramientas de estadísticas zonales disponibles en QGIS 3.10. De esta forma, se identificaron para cada una de las parroquias urbanas de la ciudad, la superficie de terreno que se encuentra expuesta al fenómeno UHI.

### 5.5.4 Evaluación del SUHI entre el área urbana y la zona de expansión

En la actualidad, se han propuesto diferentes indicadores para medir la intensidad de isla de calor urbano superficial, sin embargo, la diferencia de temperatura entre las zonas urbanas y las rurales es uno de los indicadores más ampliamente utilizados en los estudios de análisis SUHI (Madanian, Soffianian, Soltani Koupai, Pourmanafi, & Momeni, 2018). La expresión matemática utilizada para tal finalidad se presenta en la ecuación (22).

$$UHI_{(u-r)} = \overline{LST}_u - \overline{LST}_r \quad (22)$$

Donde:

$UHI_{(u-r)}$  = intensidad UHI entre el área urbana y rural (°C)

$\overline{LST}_u$  = temperatura superficial terrestre media del área urbana (°C)

$\overline{LST}_r$  = temperatura superficial terrestre media del área rural (°C)

Para la evaluación de la intensidad del SUHI entre la ciudad de Cuenca y su zona de expansión se utilizaron tres zonas de referencia (1 urbana y 2 rurales): la primera es el núcleo de la ciudad de Cuenca

(área rural), la cual fue seleccionado en función de su categoría de uso de suelo según los datos cartográficos disponibles en el SNI (Sistema Nacional de Información) para el año 2013. La tercera zona (área rural 1) se estableció mediante la limitación de un buffer negativo de 1km de distancia alrededor del área expansión de la ciudad de Cuenca. Finalmente, La segunda zona (área rural 2) quedó definida por el área remanente entre el cruce de la primera y tercera zona. Las zonas de referencia establecidas en la presente investigación se pueden apreciar en la Ilustración 17. Por último, se investigaron los cambios promedios en la LST en cada uno de los buffers previamente mencionados.

### **5.6 Validación de la temperatura superficial terrestre**

Es menester hacer hincapié en que la validación es la comparación de los resultados recuperados con los datos de referencia para evaluar la calidad de la recuperación; es un procedimiento crítico y significativo para garantizar que los resultados recuperados sean adecuados para las aplicaciones deseadas (Chen et al., 2017). La exactitud y la precisión de los resultados de recuperación se determinan mediante el procedimiento de validación, siempre que los errores o incertidumbres en los datos de referencia se comprendan y se tengan en cuenta.

Para la validación de los datos de temperatura superficial terrestre, se usó el método de validación cruzada. Este método implica la validación de los valores LST obtenidos por el método bajo prueba con valores LST bien documentados y validados recuperados de otros datos satelitales (Z. L. Li et al., 2013). Esta técnica representa un método alternativo para la validación de LST si no hay perfiles atmosféricos o mediciones de LST en tierra disponibles.

El método de validación cruzada utiliza un producto LST bien validado como referencia y compara el LST derivado del satélite de estudio con el LST referenciado (bien validado) derivado de otros satélites. Debido a las grandes variaciones espaciales y temporales en el LST, la coincidencia de coordenadas geográficas y la coincidencia temporal deben realizarse antes de que los dos productos LST derivados de satélite puedan compararse (Qian et al., 2013).

La principal ventaja de este método es que el LST se puede validar sin ninguna medida de terreno, y se puede usar en cualquier parte del mundo si hay productos LST bien validados disponibles. Como se mencionó anteriormente, la precisión de este método es sensible a los desajustes espaciales y temporales de las dos mediciones de LST, por lo tanto, el intervalo de tiempo de observación entre las dos mediciones debe ser lo más corto posible.

Los datos de LST de referencia corresponde a los derivados del instrumento MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) a bordo del satélite Aqua, específicamente del producto MYD11A1 Versión 6, el cual proporciona la temperatura de la superficie terrestre diariamente con una resolución espacial de 1km. Los datos MODIS se pueden descargar de manera gratuita a través de su plataforma web <https://lpdaac.usgs.gov/> o a través de los catálogos de imágenes satelitales disponibles en Google Earth Engine.

Para que los datos sean espacialmente consistentes, la resolución del satélite MODIS fue remuestreada a un tamaño de pixel igual a los datos de las imágenes térmicas de Landsat -8. El método de interpolación seleccionado corresponde a la convolución cúbica, esto con el fin de estandarizar la misma metodología de remuestreo en todas las imágenes evaluadas en la presente investigación.



## 6. RESULTADOS

### 6.1 Cálculo de las variables de estudio

#### 6.1.1 Cálculo de la Temperatura Superficial Terrestre (LST)

Es importante recalcar que para la derivación de LST se usó solamente la banda 10 de Landsat-8. De acuerdo con la Tabla 6, se presentan los valores máximos, mínimos y promedios de temperatura superficial terrestre obtenidos para las imágenes satelitales en el periodo de estudio 2013-2017.

Tabla 6. Valores máximos, mínimos y promedios de LST

Fecha	Tiempo (GTM)	Temperatura Máxima [°C]	Temperatura Mínima [°C]	Temperatura Promedio [°C]
2013-11-28	15:28:43	42.15	18.31	30.54
2014-10-30	15:27:15	42.78	18.09	28.45
2015-11-02	15:27:12	44.28	19.32	31.24
2016-11-20	15:27:26	41.98	18.08	31.10
2017-09-20	15:27:15	39.67	18.60	28.53

Elaborado por: Autor, 2020

El rango de variación de temperatura máxima entre las imágenes de estudio oscila entre los 39 y 42 °C, obteniendo que la imagen del año 2013 es la que presenta el valor más alto de LST, mientras que la imagen del 2017 es la que posee el valor más ínfimo de LST. Con respecto a la temperatura mínima, el rango de variación comprende los 18.08 y 19.32 °C, siendo la imagen del año 2017 la que presenta el valor más alto de LST y la imagen del año 2016 la que posee el valor más reducido de LST. Finalmente, la temperatura promedio del área de estudio posee fluctuaciones que van desde los 28.45 a 31.24 °C, de esta manera la imagen del año 2014 posee el valor de LST más exiguo, mientras que la imagen del año 2015 presenta los valores de LST más altos dentro del periodo de estudio 2013-2017. En la [Ilustración 11](#) se presenta el mapa de LST.

#### 6.1.2 Cálculo del NDVI

El NDVI es un índice de vegetación muy conocido y utilizado; es un simple pero efectivo algoritmo que permite cuantificar el estado de la vegetación. Normaliza la dispersión de las hojas verdes en la longitud de onda del infrarrojo corto y la absorción de clorofila en la longitud de onda roja. Los valores de NDVI máximos, mínimos y promedios se presentan en la Tabla 7.

El rango de valores de un NDVI es de -1 a 1. Los valores negativos de NDVI (valores cercanos a -1) corresponden al agua. Los valores cercanos a cero (-0.1 a 0.1) generalmente pertenecen a áreas áridas de roca, arena o nieve. Los valores bajos y positivos indican la presencia de arbustos y pastizales (aproximadamente 0.2 a 0.4), mientras que los valores altos corresponden a bosques templados y tropicales (valores cercanos a 1).

Tabla 7. Valores máximos, mínimos y promedios de NDVI

Fecha	Tiempo (GTM)	NDVI Máximo	NDVI Mínimo	NDVI Promedio
2013-11-28	15:28:43	0.94	-0.79	0.46
2014-10-30	15:27:15	0.93	-0.77	0.46
2015-11-02	15:27:12	0.92	-0.55	0.43
2016-11-20	15:27:26	0.90	-0.74	0.42
2017-09-20	15:27:15	0.93	-0.37	0.43

Elaborado por: Autor, 2020

El rango de variación del NDVI máximo entre las imágenes de estudio oscila entre los 0.90 y 0.94, obteniendo que la imagen del año 2013 es la que presenta el valor más alto de NDVI, mientras que la imagen del 2016 es la que posee el valor más ínfimo de NDVI. Con respecto al NDVI mínimo, el rango de variación comprende los -0.37 y -0.79, siendo la imagen del año 2017 la que presenta el valor más alto de NDVI y la imagen del año 2013 la que posee el valor más reducido de NDVI. Finalmente, el

NDVI promedio del área de estudio posee fluctuaciones que van desde los 0.42 a 0.46, de esta manera la imagen del año 2016 posee el valor de NDVI más exiguo, mientras que las imágenes de los años 2013 y 2014 presentan los valores de NDVI más altos dentro del periodo de estudio 2013-2017. En la Ilustración 7 se presenta el mapa de NDVI.

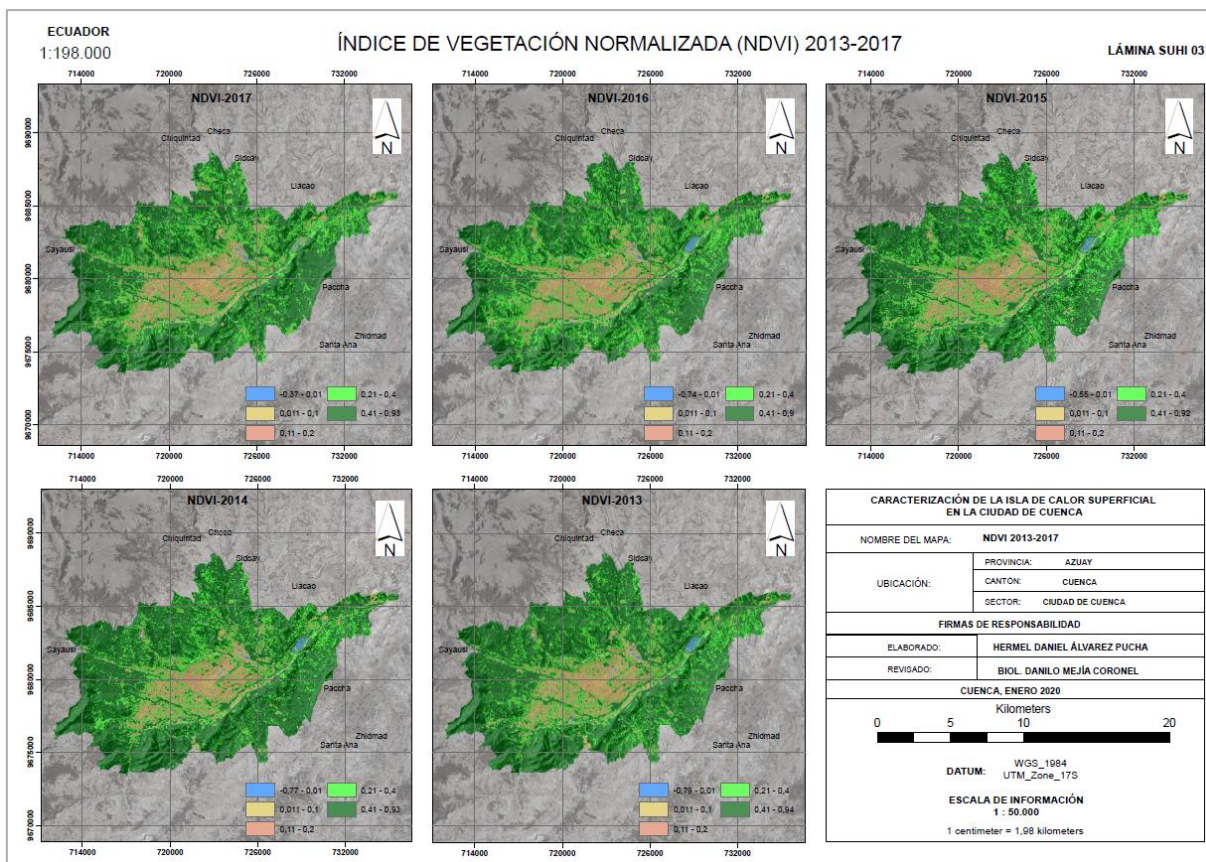


Ilustración 7. NDVI 2013-2017  
Elaborado por: Autor, 2020

### 6.1.3 Cálculo del SAVI

El índice SAVI es similar al NDVI, pero se usa particularmente en áreas donde la cubierta vegetal es baja (<40%). Cuando se expone una cantidad significativa de la superficie del suelo, la reflectancia del suelo puede influir en los valores del NDVI. La luz reflejada desde el suelo puede tener un efecto significativo en los valores de NDVI, cambiando los mismos hasta en un 20% (Huete, 1988). Los valores de NDVI máximos, mínimos y promedios se presentan en la Tabla 8.

El rango de valores a obtener para este índice se encuentra entre -1 y 1. Para valores que tienden a 1, se puede decir que la cubierta vegetal es alta y que el suelo no tiene ningún efecto en la extracción de información de la vegetación, caso contrario si los valores obtenidos son negativos. En la Ilustración 8 se presenta el mapa de SAVI correspondiente al periodo de evaluación 2013-2017.

Tabla 8. Valores máximos, mínimos y promedios de SAVI

Fecha	Tiempo (GTM)	SAVI Máxima	SAVI mínima	SAVI Promedio
2013-11-28	15:28:43	0.79	-0.13	0.29
2014-10-30	15:27:15	0.81	-0.13	0.29
2015-11-02	15:27:12	0.76	-0.24	0.26
2016-11-20	15:27:26	0.79	-0.18	0.27
2017-09-20	15:27:15	0.78	-0.11	0.29

Elaborado por: Autor, 2020

El rango de variación del SAVI máximo entre las imágenes de estudio oscila entre los 0.76 y 0.81, obteniendo que la imagen del año 2014 es la que presenta el valor más alto de SAVI, mientras que la imagen del 2015 es la que posee el valor más ínfimo de SAVI. Con respecto al SAVI mínimo, el rango de variación comprende los -0.11 y -0.24, siendo la imagen del año 2017 la que presenta el valor más alto de SAVI y la imagen del año 2015 la que posee el valor más reducido de SAVI. Finalmente, el SAVI promedio del área de estudio posee fluctuaciones que van desde los 0.27 a 0.29, de esta manera la imagen del año 2015 posee el valor de SAVI más exiguo, mientras que las imágenes de los años 2013, 2014 y 2017 presentan los valores de SAVI más altos dentro del periodo de estudio 2013-2017.

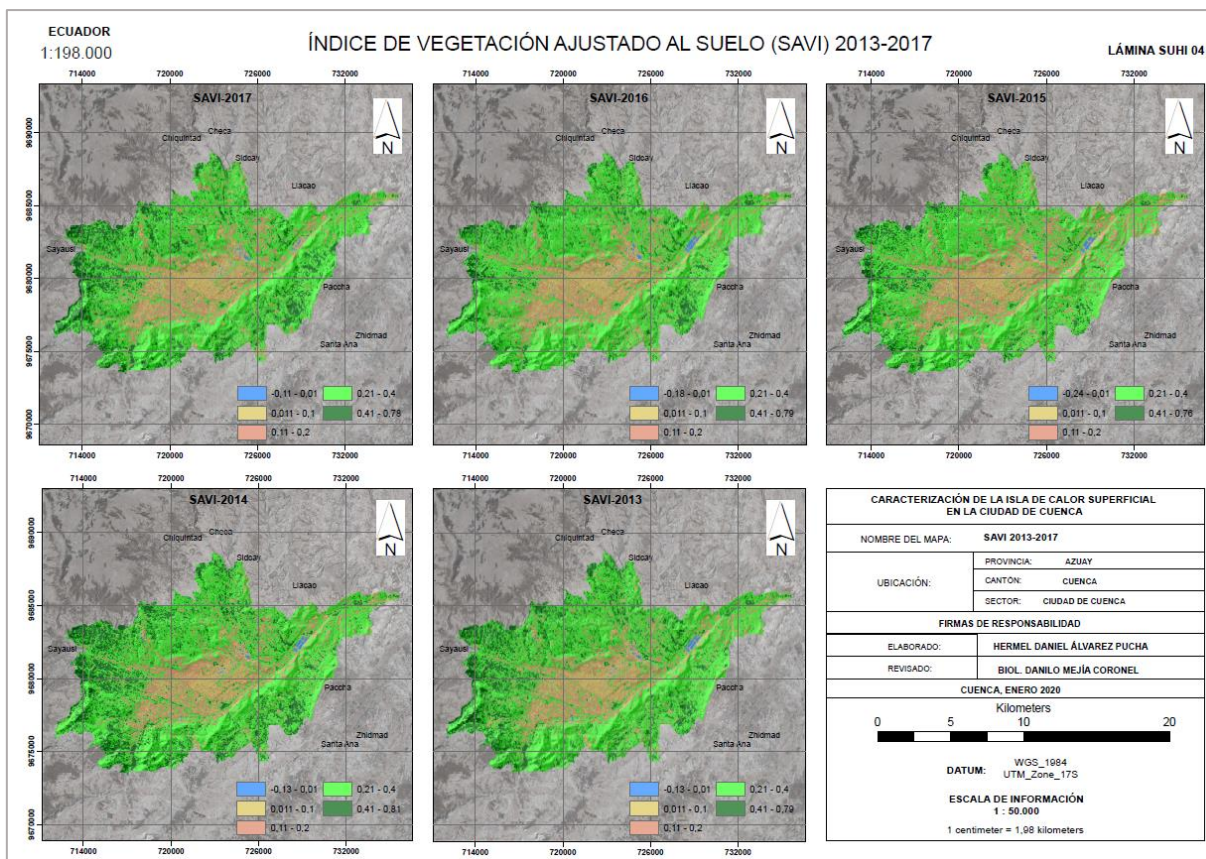


Ilustración 8. SAVI 2013-2017

Elaborado por: Autor, 2020

### 6.1.4 Cálculo del NDBI

El NDBI es uno de los índices más utilizados dentro del contexto urbano, debido a su aplicabilidad y precisión para discriminar las zonas urbanas de las zonas no urbanas (Zha et al., 2003). Al igual que los índices SAVI y NDVI el intervalo de valores finales se encuentran en un rango de -1 a 1. De esta manera, aquellos valores con tendencia negativa corresponden a zonas con alta cobertura vegetal. Los valores intermedios caracterizan a las zonas desnudas, zonas en etapas de construcción y cultivos pequeños. Finalmente, los valores positivos indican zonas antrópicas caracterizadas por poseer usos de suelos de áreas edificadas. Los valores de NDBI máximos, mínimos y promedios se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9. Valores máximos, mínimos y promedios de NDBI

Fecha	Tiempo (GTM)	NDBI Máxima	NDBI mínima	NDBI Promedio
2013-11-28	15:28:43	0.41	-0.95	-0.11
2014-10-30	15:27:15	0.48	-0.91	-0.12
2015-11-02	15:27:12	0.57	-0.99	-0.047
2016-11-20	15:27:26	0.45	-0.64	-0.09
2017-09-20	15:27:15	0.50	-0.98	-0.11

Elaborado por: Autor, 2020



El rango de variación del NDBI máximo entre las imágenes de estudio oscila entre los 0.41 y 0.57, obteniendo que la imagen del año 2015 es la que presenta el valor más alto de NDBI, mientras que la imagen del 2013 es la que posee el valor más ínfimo de NDBI. Con respecto al NDBI mínimo, el rango de variación comprende los -0.64 y -0.99, siendo la imagen del año 2016 la que presenta el valor más alto de NDBI y la imagen del año 2015 la que posee el valor más reducido de NDBI. Finalmente, el NDBI promedio del área de estudio posee fluctuaciones que van desde los -0.047 a -0.12, de esta manera la imagen del año 2014 posee el valor de NDBI más exiguo, mientras que las imágenes del año 2015 presentan los valores de NDBI más altos dentro del periodo de estudio 2013-2017. En la Ilustración 9 se presenta el mapa de NDBI.

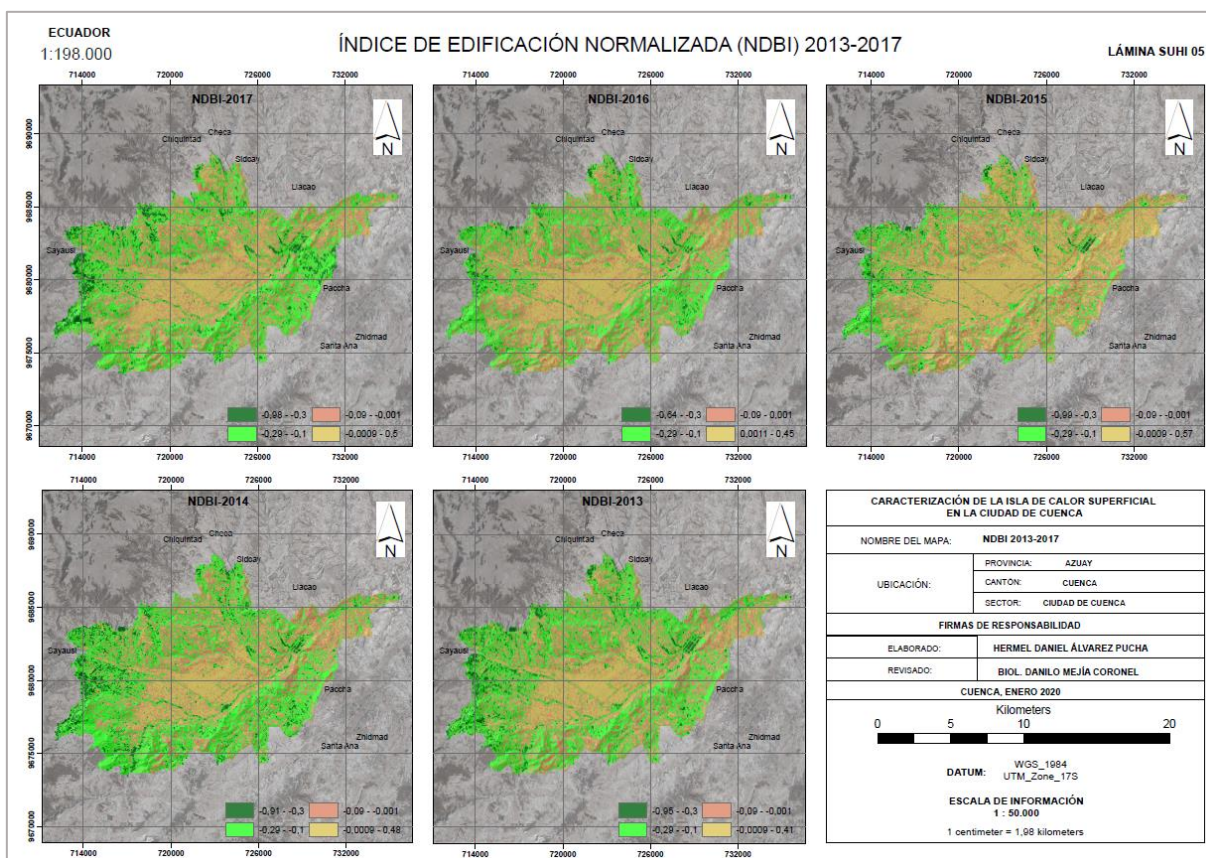


Ilustración 9. NDBI-2013-2017  
Elaborado por: Autor, 2020

Todos los índices físicos (NDVI, SAVI, NDBI) mencionados en la presente investigación han sido seleccionados por su gran representatividad en los estudios de islas de calor urbano. Varios son los artículos científicos que han evaluado el fenómeno UHI en función de la cobertura vegetal y el grado de urbanización existente en un área en particular (Hu, Meng, Zhang, & Zhang, 2020; Jamei, Rajagopalan, & Sun, 2019; Polydoros & Cartalis, 2015; Ullah et al., 2019) y han encontrado una relación significativa entre las variables analizadas y la temperatura superficial terrestre. En el acápite 6.5, se presentan los respectivos análisis de correlación.

Es menester recalcar que toda la información cartográfica elaborada en la presente investigación, se puede revisar con mayor detalle en el *Apéndice 1. Información Cartográfica*.

## 6.2 Índice de evaluación Ecológica

En el presente trabajo, el índice de variación del campo térmico urbano (UTFVI) se ha utilizado para la descripción cuantitativa del efecto de isla de calor sobre la degradación ecológica y su efecto negativo sobre la salud pública y el microclima de la ciudad. El UTFVI se clasifica en seis niveles que permiten identificar la distribución espacial del efecto de isla de calor y que se relacionan con seis índices de evaluación ecológica diferentes (ver Tabla 5). Los resultados presentados en la Ilustración 10, que evalúan el periodo de estudio 2013-2107, indican que las áreas urbanizadas de la ciudad fueron clasificadas ecológicamente como ‘Malo’, ‘Muy Malo’ y ‘Pésimo’ para todas las fechas e imágenes analizadas. Las situaciones más desfavorables se suscitaron en los años 2014 y 2015, donde todo el núcleo urbano alcanzó una valoración ecológica igual a ‘Pésimo’, por otra lado, las imágenes correspondientes a los años 2017, 2016 y 2013 denotan para el área urbana una categoría que tiende de ‘Malo’ a ‘Muy Malo’.

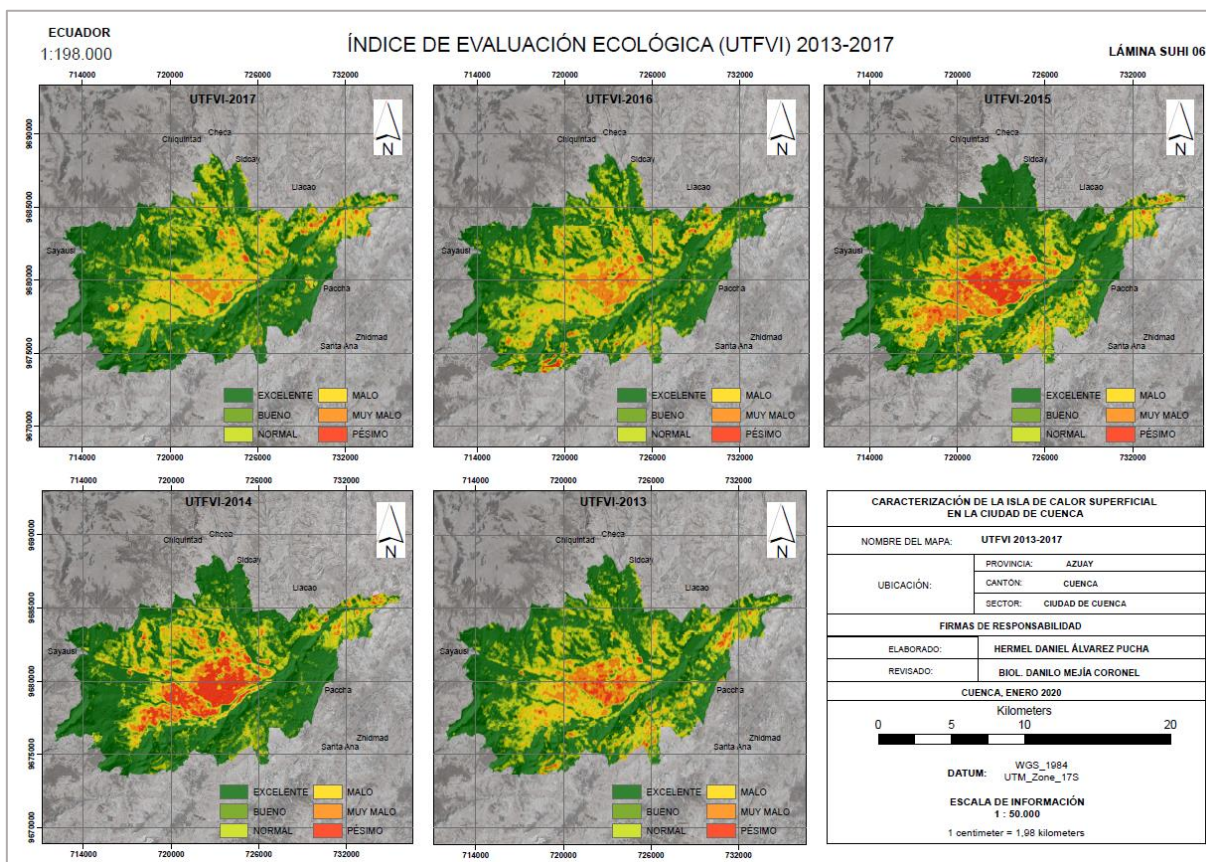


Ilustración 10. UTFVI-2013-2017  
Elaborado por: 2020

Sin embargo, y como se pueden apreciar en la Ilustración 10, las áreas cercanas al límite de expansión (zonas rurales) presentan un índice de evaluación ecológica que es ‘Excelente’ o ‘Bueno’ en todas las imágenes de estudio. Como ya se ha mencionado con anterioridad, dichas zonas se caracterizan por no poseer un alto desarrollo en comparación con la ciudad y por la presencia de franjas de cobertura vegetal a lo largo de su territorio.

Es menester recalcar que un índice catalogado como ‘Pésimo’ conduce a la degradación del medio ambiente de la ciudad y a la tendencia de crecimiento del fenómeno SUHI; acciones que pueden repercutir negativamente sobre la calidad de vida de la población de la ciudad de Cuenca, por lo tanto, para el desarrollo urbano futuro de la ciudad es necesario que se tomen las consideraciones pertinente acerca de la importancia del análisis de la temperatura superficial terrestre.



### 6.3 Distribución espacial y temporal de LST

La [Ilustración 11](#) muestra los resultados de la distribución temporal y espacial de LST en grados Celsius (°C) para los años de evaluación 2013-2017. Para disminuir los errores de estacionalidad, las imágenes adquiridas se seleccionaron en fechas correspondiente a periodos calientes. Los resultados demuestran la existencia permanente de elevadas temperaturas en el núcleo urbano de la ciudad de Cuenca, especialmente en las parroquias urbanas El Sagrario, San Blas, Totoracocha, Sucre y Gil Ramírez D; zonas caracterizadas por su densa y uniforme urbanización. No obstante, existen algunas parroquias que presentan comportamientos no uniformes de desarrollo urbano, tal es el caso de la parroquia San Sebastián, la cual solamente presenta valores elevados de temperatura en la parte este de su territorio; de manera análoga, el comportamiento térmico se repite con la parroquia Huayna Capac, donde la temperatura se concentra al oeste de su límite perimetral. Antagónicamente, la zona de expansión de la ciudad de Cuenca por poseer mayores superficies de cobertura vegetal, menor cantidad de calor antropogénico y materiales con baja difusividad térmica, presenta reducidos valores de temperatura, como es el caso de las parroquias rurales de Chiquintad, Ricaurte, Sinincay, Baños, Turi, y El Valle; que son zonas que en comparación con sector urbano aún poseen mayores porcentajes de superficies permeables.

En la Tabla 10 se indican las temperaturas superficiales promedios correspondiente a cada parroquia urbana de la ciudad de Cuenca para los años 2013-2017. Para el año 2013, la parroquia El Sagrario es la que presenta la temperatura más elevada, con un valor que alcanza los 36.27 °C, dicha magnitud es consistente con el área evaluada, principalmente porque en esta zona se desarrollan diversas actividades comerciales, existe la presencia de grandes edificaciones, es una zona altamente transitada vehicularmente, hay pocas áreas verdes y presenta un desarrollo urbano elevado. En contra parte, la parroquia Machángara es la que posee el valor más ínfimo de temperatura, alcanzado un valor de 29.87 °C; su reducida temperatura es el resultado de la presencia de franjas de cobertura vegetal, no hay asentamientos humanos de manera uniforme, existen cuerpos hídricos y sectores con abundantes áreas verdes en comparación con la parroquia El Sagrario.

Tabla 10. Caracterización de LST promedio en las parroquias urbanas de la ciudad de Cuenca

ID	Barrio	LST-2013 [°C]	LST-2014 [°C]	LST-2015 [°C]	LST-2016 [°C]	LST-2017 [°C]	Promedio [°C]
1	Sucre	34.29	34.10	36.06	35.50	31.47	34.28
2	Gil Ramírez D.	36.02	33.72	37.53	36.67	32.97	35.38
3	El Sagrario	36.27	36.08	37.81	36.81	32.90	35.97
4	San Blas	35.74	35.86	37.60	36.78	32.54	35.70
5	Cañaribamba	35.91	35.89	37.62	37.02	32.93	35.87
6	Totoracocha	34.76	34.39	36.78	36.36	31.93	34.84
7	Monay	30.61	29.03	31.67	31.45	28.34	30.22
8	Huayna Capac	32.09	31.62	34.04	33.64	30.19	32.32
9	Yanuncay	32.35	30.67	34.27	33.94	30.29	32.30
10	El Batán	32.94	30.11	34.13	34.03	30.34	32.31
11	San Sebastián	31.15	29.64	31.91	33.15	28.75	30.92
12	Bellavista	32.39	31.03	33.64	33.72	29.53	32.06
13	El Vecino	33.71	33.50	35.72	35.43	31.13	33.90
14	Machángara	29.87	28.79	31.33	31.54	29.54	30.21
15	Hermano Miguel	31.10	30.76	31.50	33.65	30.30	31.46

Elaborado por: Autor, 2020

Para el año 2014 y 2015 nuevamente la parroquia El Sagrario vuelve a poseer la temperatura promedio más elevada, con un magnitud aproximada de 36.08 y 37.81 °C respectivamente. De la misma manera, la parroquia Machángara presenta la temperatura más exigua, con un valor que alcanza los 28.79 y 31.33 °C respectivamente.

Para el año 2016, la parroquia Cañaribamba es la que presenta el más alto valor de temperatura, alcanzado así, los 37.02 °C. Por otro lado, la parroquia Monay es aquella con la temperatura más baja, siendo esta de 31.45 °C; dicha parroquia se caracteriza por no presentar un desarrollo urbano acelerado,

no cuenta con grandes edificaciones y posee usos de suelo destinados a la agricultura. No obstante, es menester recalcar que la parroquia El Sagrario presenta una temperatura de 36.81 °C, mientras que la parroquia de Machángara posee una temperatura de 31.54 °C.

Para el año 2017, la parroquia Gil Ramírez Dávalos es aquella con el más alto valor de temperatura, siendo esta igual a 32.97 °C. En contraste, nuevamente la parroquia el Monay obtiene el valor más ínfimo de temperatura, el cual alcanza un valor de 28.34 °C. Por otra parte, es importante señalar que la parroquia el Sagrario en el año 2017 alcanzó una temperatura igual a 32.9 °C, mientras que la temperatura de la parroquia Machángara llegó hasta los 29.54. °C.

Finalmente, evaluando el promedio de LST acumulado en 5 años para cada una de las parroquias urbanas de la ciudad de Cuenca; se tiene que: El Sagrario, Cañaribamba, San Blas y Gil Ramírez Dávalos son las parroquias que presentan los valores más altos de temperatura superficial terrestre siendo estos igual a 35.97, 35.87, 35.70 y 35.38 °C respectivamente.

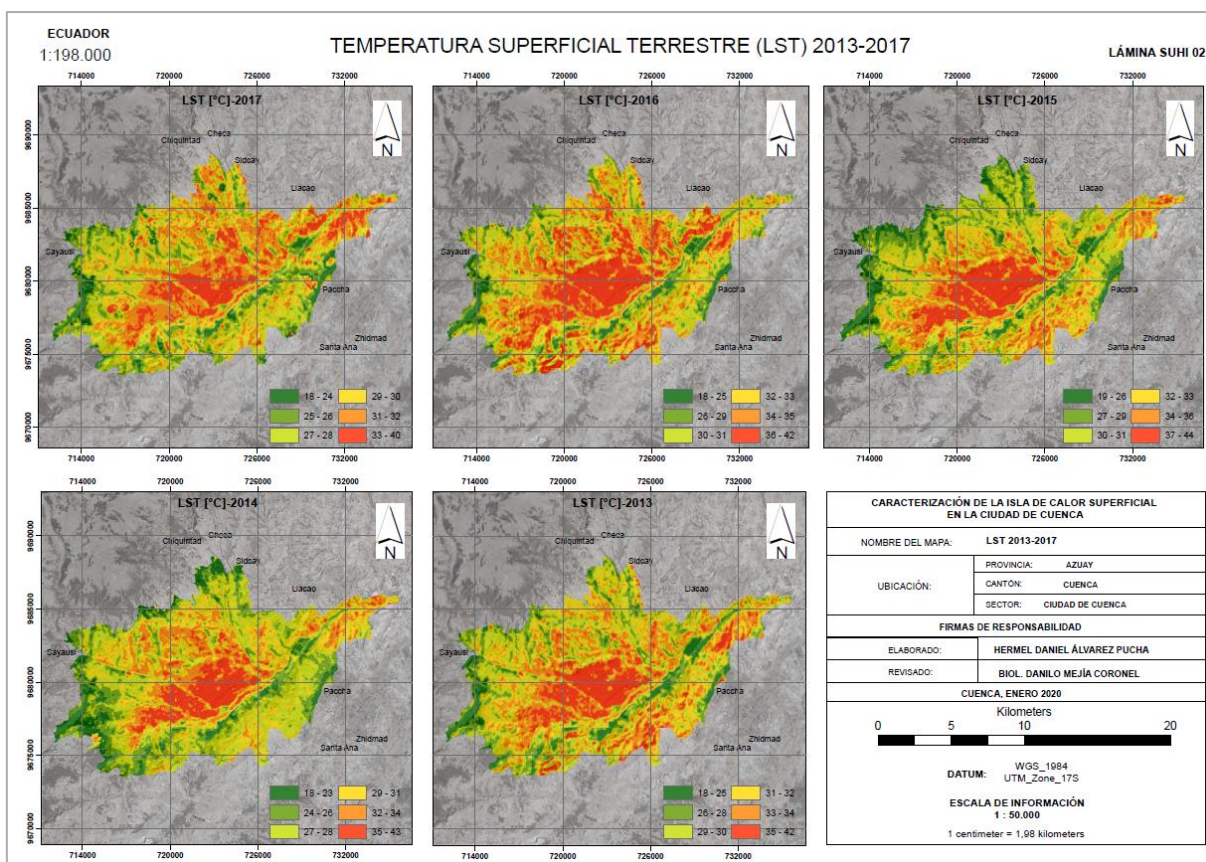


Ilustración 11. LST-2013-2017

Elaborado por: Autor, 2020

La Tabla 11 indica las temperaturas superficiales promedios correspondiente a cada parroquia rural<sup>2</sup> del cantón Cuenca para los años 2013-2017. Evaluando el promedio de LST acumulado en 5 años para cada una de las parroquias se tiene que: Nulti, Llacao, Ricaurte y Sinincay son las parroquias que presentan los valores más altos de temperatura superficial terrestre siendo estos igual a 30.87, 30.62, 30.32 y 30.12 °C respectivamente. Por otra parte, las parroquias que presentan los valores más reducidos de temperatura superficial son las siguientes: Baños, San Joaquín y Sayausí con magnitudes que alcanzan los 27.54, 27.76 y 27.91 °C respectivamente; dichas zonas se caracterizan principalmente por presentar grandes hectáreas de suelo de uso agrícola.

<sup>2</sup> Las parroquias rurales no han sido evaluadas en la totalidad de su superficie. Solamente se ha evaluado el área que se encuentran inmerso dentro de la zona de expansión.



Tabla 11. Caracterización de LST promedio en las parroquias rurales de Cuenca

ID	Barrio	LST-2013 [°C]	LST-2014 [°C]	LST-2015 [°C]	LST-2016 [°C]	LST-2017 [°C]	Promedio [°C]
1	Turi	29.24	26.34	30.26	31.44	26.82	28.82
2	El Valle	31.44	27.97	32.46	32.26	27.46	30.32
3	Paccha	29.14	26.06	29.87	29.68	26.53	28.26
4	Nulti	31.33	29.39	31.99	31.66	29.98	30.87
5	Ricaurte	30.40	28.13	30.77	32.74	29.55	30.32
6	Llacao	30.36	29.57	31.18	32.37	29.61	30.62
7	Sinincay	30.54	28.81	30.12	32.31	28.80	30.12
8	Sidcay	29.48	25.23	27.65	31.34	27.75	28.29
9	Chiquintad	29.00	24.79	27.73	31.29	28.37	28.24
10	Sayausí	28.59	27.37	27.13	30.30	26.16	27.91
11	Baños	28.05	24.25	28.95	30.01	26.43	27.54
12	San Joaquín	28.49	26.09	28.55	29.23	26.43	27.76

Elaborado por: Autor, 2020

Para mejorar la interpretación del fenómeno isla de calor superficial, en la Ilustración 12 se presentan los perfiles de temperatura para los años 2013-2017. El corte longitudinal realizado (ver Apéndice 1.3) atraviesa tanto la zona de expansión como el núcleo urbano de ciudad de Cuenca, adicionalmente, se toma en consideración que la altitud de las zonas por las que cruza el corte sea lo más uniforme posible, esto con el fin de evitar los posibles sesgos derivados del relieve.

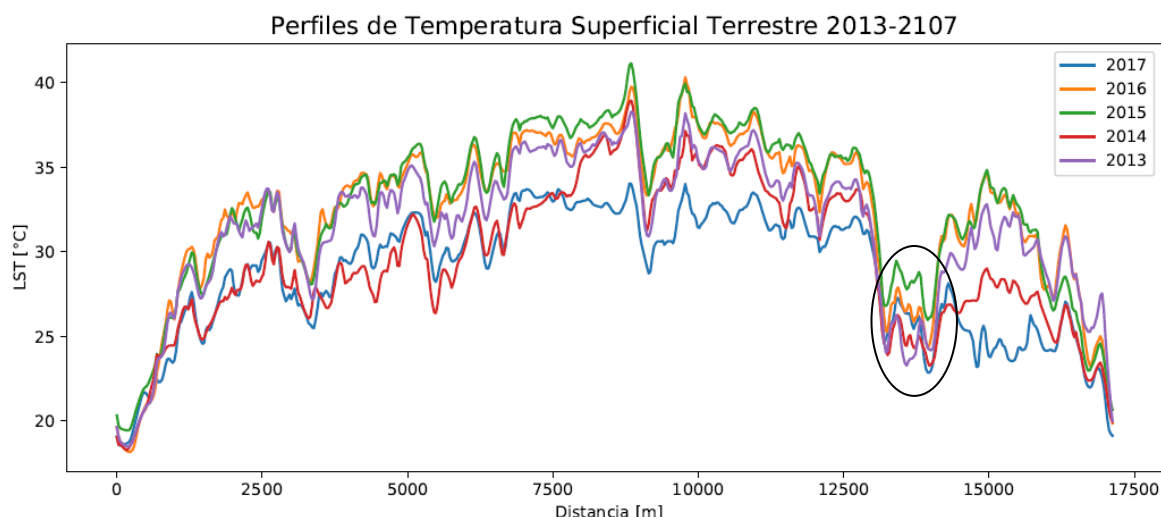


Ilustración 12. Perfiles de LST a lo largo del área de estudio 2013-2017

Elaborado por: Autor, 2020

Claramente se puede apreciar que la distribución de temperatura superficial aumenta en el núcleo de la ciudad y disminuye conforme nos vamos alejando de la misma. Es te comportamiento, como ya se ha mencionado en secciones anteriores (ver Ilustración 1), se debe principalmente a que las zonas suburbanas o rurales presentan materiales superficiales que no tienen propiedades altas para el almacenamiento de calor, en comparación con los materiales que se encuentran en las zonas urbanas. Otro factor adicional, responsable del comportamiento térmico, es el porcentaje de cobertura vegetal existente en las zonas urbanas y rurales.

Como se puede observar en la Ilustración 12, alrededor de los 13,700 m de distancia, se genera una fluctuación de temperatura notoria en los 5 años de evaluación; la razón por la que se genera dicha caída térmica es debido a que el corte realizado pasa por una zona con abundante cobertura vegetal; dicho lugar se encuentra aproximadamente a 850 m de distancia hacia el noreste del Bioparque Amaru.

## 6.4 Caracterización de SUHI en la ciudad de Cuenca

En la Ilustración 13 se presenta el mapa de caracterización de islas de calor de la ciudad de Cuenca y su zona de expansión, el cual ha sido elaborado considerando un periodo de estudio de 5 años (2013-2017) y un índice de evaluación ecológica de categoría pésimo en las 5 imágenes analizadas. Los resultados indican que las parroquias urbanas como: El Sagrario, San Blas, Cañaribamba, Gil Ramírez Dávalos, Sucre y Totoracocha son sectores que permanentemente se encuentran expuestos a los efectos del fenómeno SUHI, principalmente porque la mayor parte de su superficie se encuentra inmerso en condiciones de elevadas temperaturas. Es menester recalcar que las parroquias mencionadas con anterioridad; se caracterizan por presentar un gran desarrollo, tienen la presencia de múltiples edificaciones, el tráfico vehicular es alto, los materiales de construcción tienen difusividades altas, no existen áreas representativas de cobertura vegetal y los materiales del entorno tienen baja reflectancia solar; por lo tanto, no es de sorprenderse que dichas parroquias se encuentren almacenando calor durante el día y liberándolo por la noche. Si consideramos que el calor se libera por la noche, esto repercute de manera positiva para el confort térmico, puesto que la ciudad de Cuenca tiende a reducir la temperatura por la noche. Sin embargo, los principales problemas se suscitan durante el día, justo en los periodos de mayor actividad antrópica, donde las temperaturas de la superficie pueden alcanzar los 44 °C e inmediatamente calentar el aire por encima de estas, provocando así, la formación de olas de calor que pueden afectar a la población vulnerable (niños, niñas, adolescentes, jóvenes, adultos y adultos mayores, enfermos) de la ciudad; adicionalmente, el confort térmico de las zonas puede verse comprometido provocando estrés e iniciando problemas de salud. No obstante, todas estas consecuencias pueden exacerbarse si existe la presencia de contaminantes en el aire.

Algunas parroquias urbanas como: El Vecino, Huayna Capac y Yanuncay también presentan sectores en los que existe la presencia de islas de calor, sin embargo, el área con SUHI es muy ínfima en comparación con el área sin SUHI.

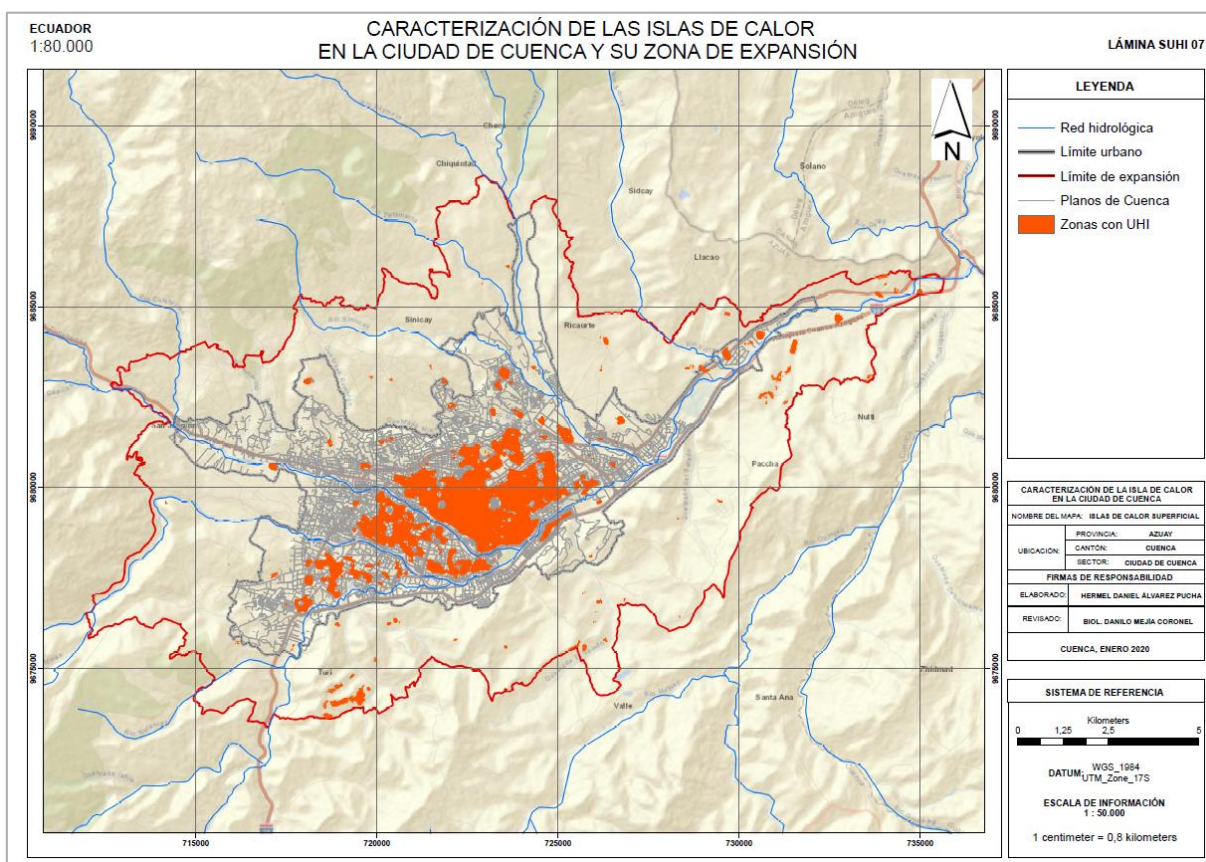


Ilustración 13. Caracterización de UHI en la ciudad de Cuenca y su área de expansión  
Elaborado por: Autor, 2020

Si bien ya se han identificado las parroquias urbanas de la ciudad de Cuenca que presentan los más altos índices de SUHI, aún no se conoce que porcentaje de superficie se encuentra expuesto; por tal razón, en la Tabla 12 se indica el área en hectáreas (ha) con y sin SUHI de cada una de las parroquias.

Las parroquias: Sucre, Gil Ramírez, El Sagrario, San Blas, Cañaribamba y Totoracocha poseen, de su superficie de territorio total, mayores áreas con SUHI que sin SUHI; alcanzando así porcentajes de 56.83, 79.08, 90.44, 82.60, 89.17 y 59.30 % respectivamente.

Tabla 12. Presencia de SUHI en la ciudad de Cuenca

ID	Barrio	Área con SUHI		Área sin SUHI		Área total
		[ha]	[%]	[ha]	[%]	[ha]
1	Sucre	148.23	56.83	112.59	43.17	260.82
2	Gil Ramírez D.	49.32	79.08	13.05	20.92	62.37
3	El Sagrario	67.23	90.44	7.11	9.56	74.34
4	San Blas	101.7	82.60	21.42	17.40	123.12
5	Cañaribamba	100.8	89.17	12.24	10.83	113.04
6	Totoracocha	201.6	59.30	137.97	40.70	339.03
7	Monay	53.91	10.56	456.48	89.44	510.39
8	Huayna Capac	72.36	18.05	328.59	81.95	400.95
9	Yanuncay	101.79	8.98	1031.58	91.02	1133.37
10	El Batán	21.15	5.54	360.9	94.46	382.05
11	San Sebastián	40.5	4.22	918.81	95.78	959.31
12	Bellavista	50.85	10.44	436.32	89.56	487.17
13	El Vecino	125.28	38.24	202.32	61.76	327.6
14	Machángara	34.92	2.47	1379.7	97.53	1424.62
15	Hermano Miguel	40.23	6.30	598.23	93.70	638.46

Elaborado por: Autor, 2020

Con el propósito de mejorar la interpretación de la caracterización de las islas de calor en la ciudad de Cuenca, en la Ilustración 14 se presenta el histograma de distribución de UHI para cada una de las parroquias urbanas. En el eje x se indica el código ID que identifica una parroquia en particular tal y como se aprecia en la Tabla 12.

La altura de las barras de color azul indica el valor de superficie que no se encuentra expuestas al fenómenos SUHI, por otro lado, las barras de color anaranjado representan la superficie de las parroquias que están inmersos en el efecto SUHI. Si se suman, tanto el valor de superficie de las barras azules y anaranjadas encontramos el área total del territorio en evaluación.

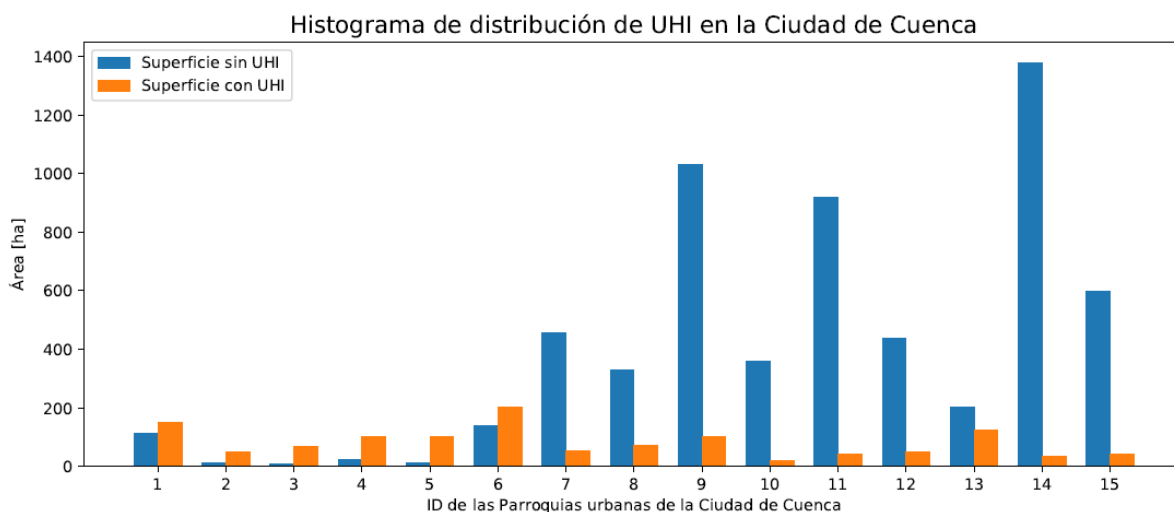


Ilustración 14. Distribución de UHI en las parroquias urbanas de Cuenca

Elaborado por: Autor, 2020

## 6.5 Análisis de Correlación entre LST y las variables biofísicas

La importancia de la vegetación en la superficie de la tierra no puede subestimarse, ya que influye en el albedo de la tierra y, a su vez, afecta la temperatura de la superficie. La vegetación ayuda a enfriar el medio ambiente y a reducir la concentración de carbono en la atmósfera, por lo que es una forma operativa para reducir las islas de calor urbano. La vegetación a través del mecanismo de evapotranspiración y la generación de sombra, reduce la temperatura de la superficie y consecuentemente la del aire (Adeyeri et al., 2017).

Para comprender mejor la relación entre la temperatura superficial y la vegetación, se realizó un análisis de correlación de Pearson entre LST y los índices físicos; para esto, se generaron 150 puntos de muestreo de forma aleatoria dentro del área de estudio (ver Apéndice 1.4), los cuales fueron analizados a través de diagrama de cajas con la finalidad de eliminar los datos atípicos presentes en la muestra.

En la Ilustración 15 se puede avizorar el diagrama de cajas para los datos de temperatura superficial terrestre, así como también, los datos atípicos presentes en la base de datos evaluada. Los diagramas complementarios para el resto de las variables se presentan en el Apéndice 2.1.

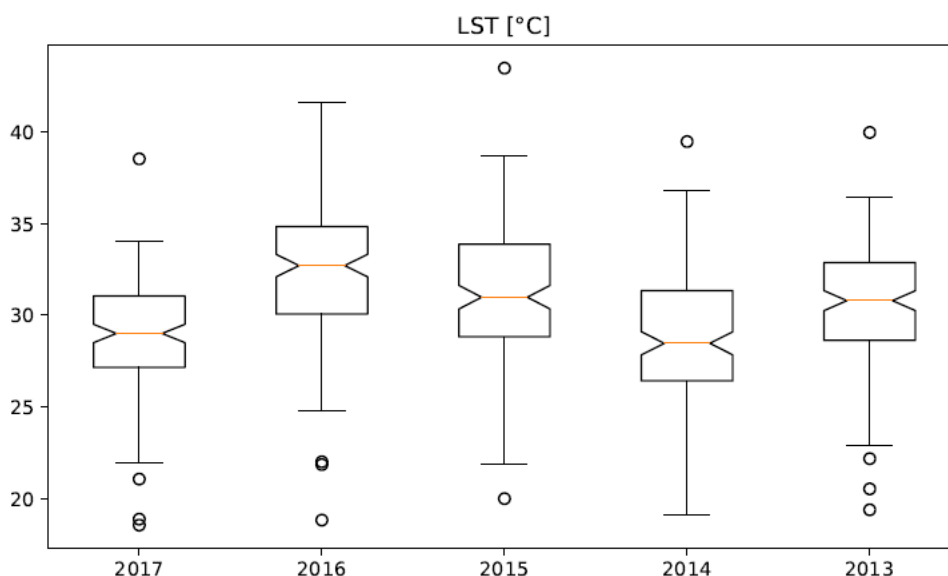


Ilustración 15. Diagrama de cajas para LST  
Elaborado por: Autor, 2020

Una vez finalizado el preprocesamiento de los datos, se continuó con la elaboración de diagramas de dispersión entre cada una de las variables de estudio para determinar la correlación existente entre las mismas. En la Ilustración 16 se indican los gráficos de dispersión, para el año 2017, entre LST y las variables de estudio NDBI, SAVI y NDVI, adicionalmente, se establece el valor de  $R^2$  (coeficiente de determinación) para conocer qué tan cerca están los datos de la línea de regresión ajustada.

Los resultados de la Ilustración 16 muestran que para el año 2017 el  $R^2$  entre LST y NDBI es 0.428, para LST y SAVI es 0.366 y finalmente para LST y NDVI es 0.479. Recordando que un valor igual a 0 indica que el modelo no explica la variabilidad de los datos de respuesta en torno a su media, mientras que un valor igual a 1 indica que el modelo explica toda la variabilidad de los datos de respuesta en torno a su media. Los diagramas de dispersión para los años 2016, 2015, 2014 y 2013 se indican en el Apéndice 2.2.

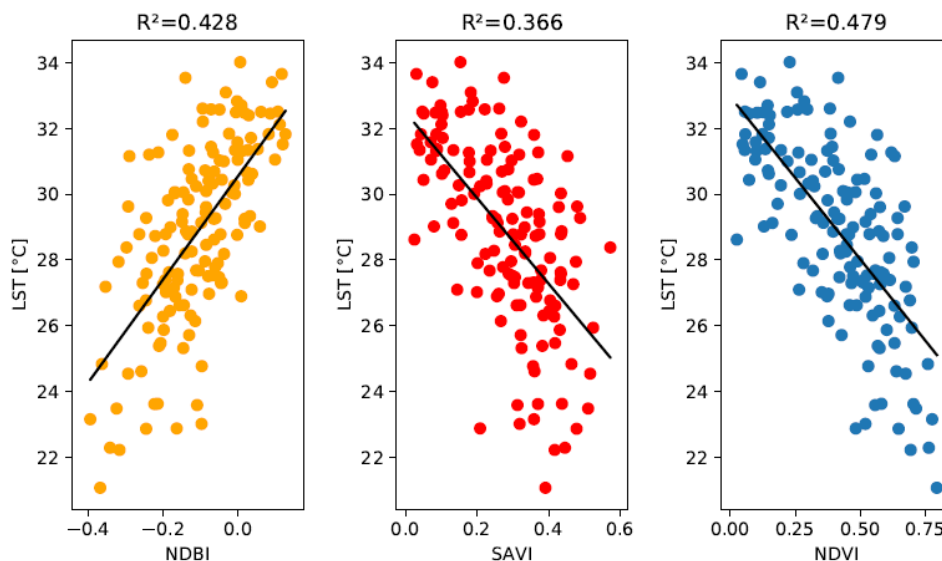


Ilustración 16. Diagrama de dispersión para las variables del año 2017  
Elaborado por: Autor, 2020

En la Tabla 13, se presentan los resultados del coeficiente de correlación de Pearson entre LST y los índices físicos SAVI, NDVI y NDBI. Los resultados indican que para el año 2013 tanto el SAVI como el NDVI exhiben una correlación negativa moderada ( $r$  es -0.484 y -0.573 respectivamente), mientras que el NDBI presenta una correlación positiva moderada ( $r$  es 0.553).

Para el año 2014 el SAVI presenta una correlación negativa moderada ( $r$  es -0.541), el NDVI exhibe una correlación negativa fuerte ( $r$  es -0.636), mientras que el NDBI denota una correlación positiva fuerte ( $r$  es 0.616).

Para el año 2015 el SAVI presenta una correlación negativa moderada ( $r$  es -0.588), el NDVI exhibe una correlación negativa fuerte ( $r$  es -0.666), mientras que el NDBI denota una correlación positiva fuerte ( $r$  es 0.656).

Para el año 2016 el SAVI presenta una correlación negativa moderada ( $r$  es -0.575), el NDVI exhibe una correlación negativa fuerte ( $r$  es -0.670), mientras que el NDBI denota una correlación positiva fuerte ( $r$  es 0.673).

Finalmente, para el año 2017, tanto el índice SAVI como el NDVI exhiben una correlación negativa fuerte ( $r$  es -0.605 y -0.692 respectivamente), mientras que el NDBI presenta una correlación positiva fuerte ( $r$  es 0.654).

Tabla 13. Correlación de Pearson entre LST y las variables físicas

Fecha	Tiempo (GTM)	SAVI	NDVI	NDBI
2013-11-28	15:28:43	-0.484	-0.573	0.553
2014-10-30	15:27:15	-0.541	-0.636	0.616
2015-11-02	15:27:12	-0.588	-0.666	0.656
2016-11-20	15:27:26	-0.575	-0.670	0.673
2017-09-20	15:27:15	-0.605	-0.692	0.654

Elaborado por: Autor, 2020



## 6.6 Evaluación del SUHI entre el área urbana y la zona de expansión

En la Ilustración 17 se indican las zonas evaluadas para determinar la intensidad SUHI. La zona urbana está determinada por el núcleo de la ciudad de Cuenca (polígono fucsia), la zona rural 1 (polígono morado) y la zona rural 2 (polígono rojo); dicho criterio se estableció en función de la metodología propuesta por Madanian et al. (2018).

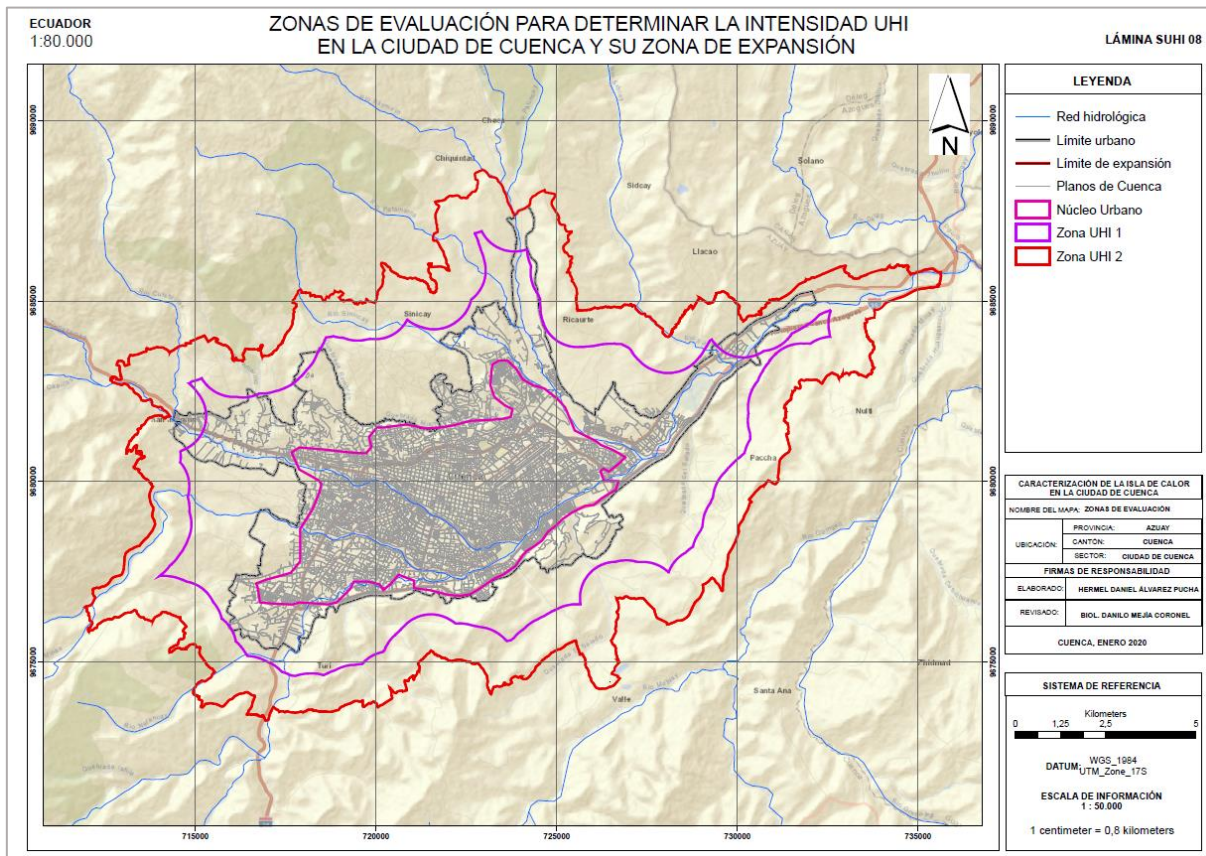


Ilustración 17. Zonas de evaluación para el análisis del efecto SUHI

Elaborado por: Autor, 2020

A través de técnicas de estadísticas zonales, para cada una de las zonas de referencia, se estimó la temperatura superficial terrestre promedio durante el periodo de evaluación 2013-2017. De esta manera, se determinó el LST promedio urbano ( $LST_u$ ), el LST promedio de la zona rural 1 ( $LST_{r1}$ ) y el LST promedio de la zona rural 2 ( $LST_{r2}$ ); conocidos estos datos se procedió a utilizar la ecuación (22). En la Tabla 14, se presentan los resultados correspondientes a la magnitud SUHI para cada una de las imágenes analizadas.

Tabla 14. Intensidad de SUHI entre el área urbana y rural

Fecha	$LST_u$ [°C]	$LST_{r1}$ [°C]	$LST_{r2}$ [°C]	$SUHI_{(u-r1)}$ [°C]	$SUHI_{(u-r2)}$ [°C]
2013-11-28	33.76	30.12	29.45	3.64	4.31
2014-10-30	32.87	28.03	26.78	4.84	6.09
2015-11-02	35.51	30.98	29.48	4.53	6.03
2016-11-20	35.09	31.91	30.87	3.18	4.22
2017-09-20	31.22	28.26	27.53	2.96	3.69
Promedio [°C]	33.69	29.86	28.82	3.83	4.87

Elaborado por: Autor, 2020

Los resultados exhibidos en la Tabla 14, indican que para el año 2013, la magnitud SUHI alcanza un valor de 3.64 °C cuando se evalúa el núcleo urbano con la zona rural 1. Por otra parte, si se analiza la diferencia de temperaturas superficiales entre el núcleo de la ciudad y la zona rural 2, se tiene un SUHI de 4.31 °C. Como es de esperarse, a medida que nos alejamos del centro de la ciudad, el LST comienza a disminuir, razón por la cual, la diferencia de temperatura entre las zonas urbanas y rurales (Intensidad SUHI) tiende a incrementar. Con respecto al año 2017, la magnitud SUHI presenta un valor de 2.96 °C cuando se evalúa el núcleo urbano con la zona rural 1. Por otra lado, si se analiza la diferencia de temperaturas superficiales entre el núcleo de la ciudad y la zona rural 2, se alcanza un valor SUHI de 3.69 °C. El valor de SUHI más alto entre el área urbana, la zona rural 1 y 2, se da en el año 2014 siendo estos valores igual a 4.84 y 6.09 °C respectivamente.

El comportamiento de aumento de Intensidad SUHI conforme nos alejamos del centro del núcleo urbano se puede avizorar de manera oportuna en la Ilustración 18. Donde las barras anaranjadas (zona más alejada del centro urbano) presentan las magnitudes más altas en comparación con las barras azules (zonas más cercanas al centro urbano).

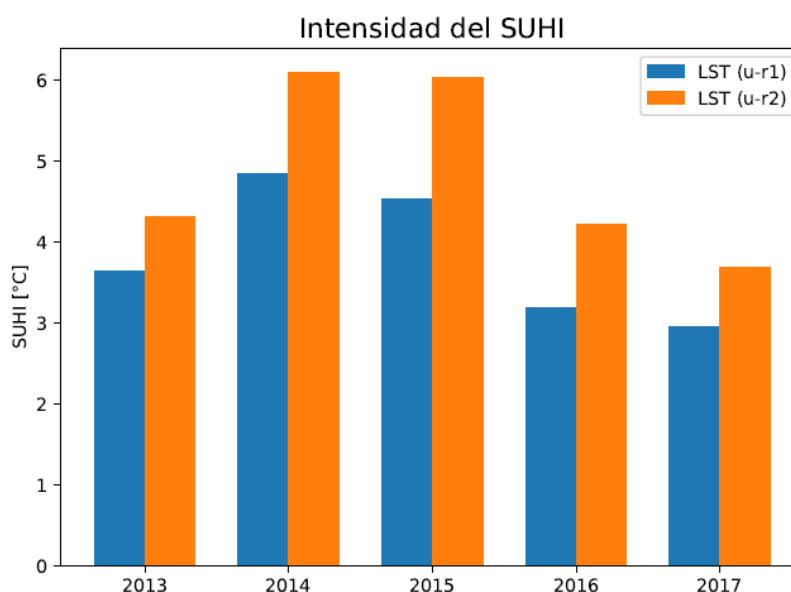


Ilustración 18. Intensidad SUHI 2013-2017

Elaborado por: Autor, 2020

Finalmente, para evaluar de manera representativa se procedió a realizar un promedio, durante los cinco años de estudio, de la intensidad SUHI. De esta manera se obtuvo que el SUHI promedio entre el área urbana y la zona de referencia número 1 poseen una intensidad de 3.83 °C, frente a los 4.87 °C promedio que se alcanzó al evaluar la diferencia de LST entre el área urbana y la zona de referencia número 2.

Es importante recalcar que el fenómeno SUHI se intensifica a medida que nos alejamos del centro de la ciudad, por motivos de balances energéticos. En la zona rural existe un gran porcentaje de cobertura vegetal que mediante la evapotranspiración reducen el calor que llega y se almacena la superficie del suelo. En contraste, la zona urbana posee un alto índice de superficies impermeables que a través de escorrentía superficial derivan el agua lluvia a los alcantarillados, lo que provoca que la radiación solar impacte y se almacene de forma directa sobre el suelo. Adicionalmente, el alto grado de desarrollo que presenta un área urbana frente a la rural, es un factor importante a considerar; puesto que el calor o la energía antropogénica emitida al ambiente juegan un rol importante en la intensidad del fenómeno isla de calor urbano superficial.



## 6.7 Validación de los datos de LST

Para validar el algoritmo de recuperación de LST propuesto, se utiliza un método de intercomparación (validación cruzada) que utiliza el producto LST V6 validado, derivado de MODIS MYD11A1 a una resolución de 1 km (Ver Apéndice 1.5). El método que MODIS utiliza para obtener el LST corresponde a la técnica de ventana dividida, conocida también como Split Window (Wan, 2014).

Teniendo en cuenta que el LST en la escala de píxeles del satélite varía rápidamente con altas variaciones espacio-temporales, la precisión del método de intercomparación depende de la coincidencia de coordenadas geográficas, la coincidencia temporal y la resolución espacial (H. Tang & Li, 2013). Considerando que las resoluciones espaciales para Landsat-8 y MODIS son 30m y 1km, respectivamente, se toman en cuenta la diferencia espacial entre estos dos LST. Por la tanto, los LST de referencia de MODIS se remuestrean a una resolución de 30m de acuerdo con el método de interpolación convolución cúbica.

El tiempo de observación para el satélite Landsat-8 es a las 15:27 GTM, mientras que para MODIS es un promedio de las temperaturas diurnas, ambas imágenes con fechas correspondientes al 20 de noviembre del 2016<sup>3</sup>.

Para la evaluación de la desviación cuadrática media (por sus siglas en inglés RMSD) se seleccionaron 58 puntos de control distribuidos en el área de estudio (Ver Apéndice 1.6), los cuales fueron elegidos considerando su inercia térmica y el relieve; esto con la finalidad de reducir tanto el sesgo temporal como el topográfico (Thenkabail, 2015). En la Ilustración 19 se presenta la comparación entre los datos obtenidos con el Modelo propuesto por M. Wang et al. (2016) y los derivados de MODIS.

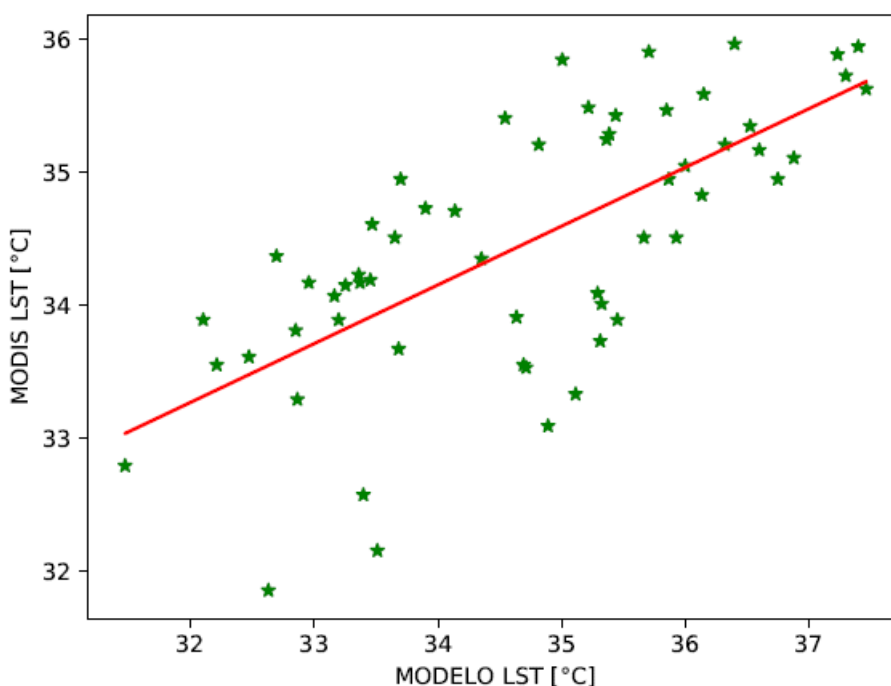


Ilustración 19. Comparación entre LST derivado de MODIS y el Modelo propuesto por M. Wang et al. (2016)

Elaborado por: Autor, 2020

Finalmente, los resultados de validación entre los datos LST generados con el método propuesto y los datos LST recuperados de MODIS presentaron un RMSD de 1.12 °C. Los puntos de referencia, utilizados para la validación, se pueden observar en el Apéndice 2.3.

<sup>3</sup> Solamente se evaluó la imagen del año 2016, esto debido a la falta de disponibilidad de información correspondiente a MODIS para las fechas restantes.

## 7. DISCUSIÓN

### 7.1 *Índices de vegetación*

De acuerdo con los resultados presentados en la Ilustración 7, el núcleo urbano de la ciudad de Cuenca presenta valores de NDVI inferiores a 0.2, mientras que las zonas adyacentes (áreas con vegetación) al límite de expansión alcanzan valores de NDVI mayores a 0.3, esto concuerda con los resultados obtenidos por Yadav et al. (2017) quien luego de evaluar el NDVI en dos localidades de la India, concluyó que los valores altos de NDVI corresponden a localidades con un alto índice de vegetación, mientras que los valores cercanos a cero y negativos corresponden a zonas sin vegetación, suelos desnudos y áreas densamente urbanizadas. En la Ilustración 8, se presentan los resultados pertenecientes al índice SAVI, en los cuales se puede apreciar un patrón similar al obtenido con el NDVI, este comportamiento también se observó en el estudio realizado por Vani (2017), quien indica que el SAVI es un complemento del NDVI. De manera opuesta a los índices mencionados con anterioridad, en la Ilustración 9 se muestran los resultados del NDBI, el cual obtiene valores cercanos y mayores a cero para aquellas zonas con un elevado porcentaje de superficies impermeables, tal y como sucede para el núcleo de la ciudad. En contra parte, para las zonas adyacentes al casco urbano el valor del NDBI es negativo (menores a -0.1). En el presente estudio los índices NDVI y SAVI han sido utilizados para caracterizar, dentro del área de estudio, aquellas zonas con cubierta vegetal. En cambio, el NDBI ha sido implementado para representar las zonas urbanas; esto según lo expuesto por Guha, Govil, Dey, & Gill (2018) quienes determinaron que dichos índices son los más representativos para la evaluación del LST.

### 7.2 *Índice de evaluación ecológica*

Los resultados presentados en la Ilustración 10 indican la ocurrencia de dos extremos de evaluación ecológica: Excelente ( $<0$ ) y Pésimo ( $>0.020$ ). Para todas las imágenes y fechas analizadas, el desarrollo urbano concentrado en lugares específicos conduce a la degradación ecológica y ambiental, lo que en consecuencia lleva a la clasificación de 'Pésimo' en el índice de evaluación ecológica. Este resultado concuerda con el estudio de dos Santos et al. (2017) en la municipalidad de Villa Vieja, en Brasil, que concluyó que el desarrollo urbano desordenado y denso genera degradación ecológica y ambiental en las ciudades.

Por otro lado, las áreas subdesarrolladas y alejadas del centro del núcleo urbano, obtuvieron una clasificación 'Excelente y Bueno' en el índice de evaluación ecológica. Sin embargo, los resultados también indicaron que las áreas no urbanizadas y que son evaluadas ecológicamente como 'Malo y Pésimo' probablemente sean zonas con ambientes y paisajes degradados, como tierras de cultivo, pastoreo o áreas mineras mal manejadas.

Ecuador, como los demás países latinoamericanos, presentó un intenso proceso de urbanización, especialmente en la segunda mitad del siglo XX. La urbanización de las ciudades ecuatorianas ha dado lugar a grandes problemas que deben corregirse, como la planificación del espacio urbano, de donde nació la planificación de la ciudad como una técnica y ciencia para este propósito. De esta necesidad de organizar el espacio habitable, surgió en el 2016 la Ley Orgánica de Ordenamiento Territorial, Uso y Gestión de Suelo con el objetivo de promover el desarrollo equitativo y equilibrado del territorio urbano y rural.

El papel crucial que tienen las áreas con vegetación en la calidad ecológica y ambiental de las ciudades es cada vez más evidente. Por lo tanto, aumentar las áreas con vegetación en zonas urbanas puede ser una forma efectiva de mitigar el efecto SUHI y, en consecuencia, mejorar la calidad ecológica y ambiental de los centros urbanos. Los mapas de evaluación ecológica que utilizan el UTFVI pueden proporcionar información útil para los administradores de las autoridades públicas sobre la planificación urbana y el desarrollo futuro de la ciudad (Singh et al., 2017).

### 7.3 *Distribución espacial y temporal de LST*

Acorde con los resultados presentados en la Ilustración 11, la temperatura superficial terrestre promedio estimada para el año 2013 alcanza un valor de 30.54 °C, para el año 2014 el valor promedio de LST tiende a disminuir resultando en 28.45 °C, en los años 2015 y 2016 el LST promedio incrementa a valores iguales a 31.24 y 31.10 °C respectivamente. Finalmente, para el año 2017 la temperatura superficial disminuye a 28.53 °C. Las temperaturas superficiales más altas se presentan en el núcleo de la ciudad de Cuenca y conforme nos alejamos de esta zona el LST tiende a disminuir. Resultados similares a los obtenidos en el estudio, fueron reportados por Feng et al. (2019) quienes encontraron que los máximos valores de LST aparecen en el centro de la ciudad de Suzhou, en China. De manera más específica, en el estudio realizado por Guillén (2016) en la ciudad de Cuenca, el autor menciona que los puntos de mayor temperatura corresponden a la zona este del Centro Histórico, el terminal de buses, el aeropuerto, el parque industrial, los alrededores de la Avenida Huayna Capac, La Feria libre y algunas áreas del sector Totoracocha; dichos lugares presentan valores con temperaturas superficiales que se encuentran en el rango de 24.5 y 29.2 °C. Haciendo un símil entre el presente estudio y el elaborado por Guillén (2016) podemos establecer que las zonas calientes, previamente mencionadas, coinciden con las encontradas en la investigación (ver Tabla 10). Adicionalmente, Guillén (2016) concluye que las zonas con más altos valores de LST dentro de la ciudad de Cuenca son áreas con: espacios de poca y nula vegetación, mayor afluencia vehicular, mayor densidad poblacional y actividades industriales.

Conforme se aleja del centro urbano de Cuenca, se encuentran zonas subdesarrolladas, que aún mantienen un porcentaje elevado de superficies vegetales en comparación con el área urbana; factor principal que repercute en las diferencias de LST de un sector a otro. Este hecho encontrado en el estudio y representado en la Ilustración 12, ya ha sido documentado en estudios previos. Amanollahi et al. (2016) luego de evaluar la evolución de las islas de calor en la Kuala Lumpur, Malasia, concluyó que el desarrollo de las áreas urbanas reduce directamente la cobertura vegetal natural e incrementa indirectamente los valores de LST y la contaminación del aire.

Por otro lado, Silva et al. (2018) a través de su estudio realizado en el municipio de Paco do Lumiar, en Brasil, determinaron que los valores promedios más altos de LST se encontraron en las áreas urbanas, con magnitudes que oscilaron entre los 26.49 y 33.52 °C. De manera adicional, los autores concluyen que en todas las imágenes satelitales analizadas, las bajas temperaturas superficiales se observaron en áreas con agua y vegetación, mientras que las más altas se evidenciaron en áreas con una alta densidad de construcción compuestas por edificios de altura media y alta.

### 7.4 *Caracterización y evaluación de SUHI*

Según resultados presentados en la Tabla 12, las parroquias urbanas de la ciudad de Cuenca que presentan mayores porcentajes de superficies con altos valores de LST son: El Sagrario, Cañaribamba, San Blas, Gil Ramírez, Totoracocha y Sucre. Todos estos sectores se caracterizan por presentar dentro de su territorio más del 50% de su área cubierto por altas temperaturas superficiales, lo que repercute de manera directa en la formación de islas de calor. Tales parroquias se caracterizan por ser sectores con grandes movimientos comerciales, alta densidad poblacional, poca o nula áreas con vegetación, alto índice de edificaciones y alto tráfico vehicular. En contra parte, las parroquias de Machángara, San Sebastián, El Batán y Hermano Miguel tienen porcentajes ínfimos de sectores con la presencia de altos valores de LST; esto debido a que son zonas con presencia de cuerpos hídricos y con abundante vegetación, factores principales encargados de reducir las temperaturas superficiales a través de mecanismos como la evaporación y la transpiración.

Los valores de SUHI presentados en la Tabla 14, indican que en el año 2017 se obtuvieron los valores más reducidos de SUHI, siendo estos iguales a 2.96 y 3.69 °C evaluando la diferencia de LST entre el núcleo urbano con la zona rural 1 y zona rural 2 respectivamente. Por otro lado, los valores más altos de SUHI se suscitaron en el año 2014 alcanzando magnitudes de 4.84 y 6.09 °C. Resultados similares fueron obtenidos por Meng et al. (2018) en Beijing, en China, al determinar que el SUHI es mayor cuando se evalúa el área urbana con el límite rural.

En la investigación realizada por Campoverde (2018), en la ciudad de Cuenca, se demuestra que evaluando el UHI a través de estaciones meteorológicas, se obtiene un valor de 3.24 °C cuando se realiza la diferencia entre la estación El Vecino y Quingeo. Por otra parte, si se considera la estación Yanuncay CTS y Quingeo la magnitud UHI que se obtiene es de 2.82 °C. Para Campoverde (2018) estos los principales puntos de máxima intensidad de UHI al comparar estaciones del área urbana con estaciones del área rural. Según los resultados obtenidos por Sheng, Tang, You, Gu, & Hu (2017) al comparar el UHI derivado de estaciones meteorológicas y Landsat-5 determina que el valor calculado de UHI utilizando Landsat-5 es más intenso que el de las estaciones. Adicionalmente, concluye que los datos UHI derivados de estaciones meteorológicas y Landsat-5 son totalmente diferentes y no pueden ser comparados. Por otro lado, Guillén (2016) concluye que en la ciudad de Cuenca, el LST es mayor que la temperatura del ambiente.

Valores de UHI más altos que los mencionados en nuestro estudio fueron expuestos por Silva et al. (2018), quienes encontraron diferencias entre las temperaturas superficiales promedio del área urbana y rural iguales a 10.89 y 11.50 °C para los años 1999 y 2010 respectivamente, utilizando imágenes satelitales de Landsat-5 y 8.

### 7.5 *Análisis de Correlación*

Acorde con los resultados expresados en la Tabla 13, el más alto valor del coeficiente de Pearson entre LST y NDVI se exhibe en el año 2017, con un valor igual a -0.692, dicho coeficiente es menor al obtenido en el estudio realizado por Danodia, Nikam, Kumar, & Patel (2017) en Uttar Pradesh, en India, quienes luego de evaluar el LST y el NDVI determinaron que la relación existente entre las variables era -0.916. No obstante, el coeficiente obtenido en el estudio es similar al recuperado por Hishe, Lyimo, & Bewket (2017) quienes determinaron un coeficiente de correlación igual a -0.64 para el año 2000. Con respecto a la correlación existente entre LST y NDBI, en el año 2016 se presenta el valor más alto siendo este 0.673, resultado similar al encontrado por Jami Aymacaña et al. (2018) en el cantón Rumiñahui, en Ecuador, quienes luego de evaluar el LST y el NDBI determinaron que la relación existente entre las variables era 0.68 para el año 2001 al utilizar imágenes Landsat-7. Por otro lado, el coeficiente de Pearson más alto entre LST y SAVI denota una valor igual a -0.605 para el año 2017, dicho coeficiente es menor al encontrado por Hishe et al. (2017) en Etiopía, quienes luego de evaluar el LST y SAVI determinaron que la relación existente entre ambas variables era -0.51 para el año 2000 al utilizar imágenes de Landsat-5. Las correlaciones negativas indicada en la presente investigación (LST-NDVI y LST-SAVI), así como también las positivas (LST-NDBI) son tendencias que ya han sido indicadas y evaluadas en estudios previos (Baño et al., 2018; Feng et al., 2019; Jamei et al., 2019).

### 7.6 *Validación de datos*

El coeficiente de correlación de Pearson, según el diagrama de dispersión indicado en la Ilustración 19, presenta un valor igual a 0.7 cuando se evalúan los datos LST recuperados de MODIS y el modelo propuesto por M. Wang et al. (2016). Dicho resultado es poco mayor al obtenido por Guha et al. (2018), quienes luego de comparar datos de LST provenientes de MODIS y Landsat-8 para las ciudades de Nápoles y Florencia, en Italia, lograron obtener valores de 0.56 y 0.61 respectivamente.

Por otro lado, el RMSD que se obtuvo al evaluar los datos LST de MODIS y del modelo propuesto, alcanzó un valor de 1.12 °C, error que es ligeramente más alto que el encontrado por M. Wang et al. (2016), quienes luego de evaluar los datos LST con información in situ lograron obtener un RMSD igual a 1.04 °C.

La validación cruzada usada en la presente investigación, es uno de los mecanismos más usados dentro del campo de percepción remota. La falta de sensores que midan el LST en un lugar determinado, genera la escasez de información primaria para el desarrollo comparativo de datos, por tal razón, el uso de satélites de referencia se ha convertido en un método óptimo para la validación de la información obtenida (Qian et al., 2013; B. H. Tang et al., 2015; Wan, 2014).

## 8. CONCLUSIONES

En el presente estudio, los datos TIR, NIR y SWIR de Landsat-8 fueron utilizados para recuperar los valores de temperatura superficial terrestre e índices físicos para el periodo de evaluación 2013-2017 de un conjunto de 5 imágenes satelitales. Los resultados demostraron que los valores más altos de LST se presentan en el núcleo de la ciudad de Cuenca, mientras que los valores más bajos se suscitaron en la frontera de la zona de expansión para todas las imágenes evaluadas, de esta manera, las magnitudes de LST promedio fluctúan entre los 28.45 y 31.24 °C. Con respecto a los índices SAVI y NDVI la tendencia evolutiva indica que en el casco urbano se presentan los valores más bajos, aumentando conforme nos alejamos del mismo, así, se alcanzan valores promedios que oscilan entre los 0.42-0.46 para el NDVI y 0.26-0.29 para el SAVI. Por otro lado, el índice NDBI que indica la presencia de superficies impermeables, denota valores elevados en el núcleo de la ciudad de Cuenca, los cuales tienden a disminuir conforme las superficies son reemplazadas por vegetación, los valores promedios alcanzados se encuentran en un rango de -0.11 y -0.047.

El índice de variación de campo térmico urbano (UTFVI) se realizó para la ciudad de Cuenca y a través de esta condición se determinó el estado ecológico de la ciudad. Se observó que a lo largo de los años, el peor índice de evaluación ecológica se presentó en las áreas urbanas altamente pobladas, factor que conduce a la degradación paulatina del medio ambiente.

Con la presente investigación se determinó que las parroquias urbanas El Sagrario, Cañaribamba, San Blas, Gil Ramírez, Totoracocha y Sucre son las principales áreas que están siendo perjudicadas por los efectos de las islas de calor. Tales parroquias poseen superficies con la presencia de SUHI en más del 50% de su territorio y presentan valores de LST promedio que oscilan entre los 34.28 y 35.97 °C. En contraste, las parroquias Machángara, San Sebastián, El Batán y Hermano Miguel son sectores con presencia de SUHI en menos del 10% de su territorio y denotan valores de LST que fluctúan entre 30.92 y 31.46 °C. Así, la diferencia de temperatura existente entre las parroquias urbanas con más altos y bajos valores de LST alcanza un valor aproximado de 4 °C.

La magnitud SUHI encontrada al evaluar la diferencia de temperaturas superficiales entre el núcleo urbano de la ciudad de Cuenca y su zona de expansión permitió determinar que conforme se aleja del centro de la ciudad la temperatura tiende a disminuir. Los resultados, evaluando los 5 años de estudio, indican que el SUHI obtenido puede alcanzar valores similares a 3.83 °C y conforme nos alejamos del casco urbano se pueden encontrar magnitudes iguales a 4.87 °C; esto confirma que las áreas adyacentes a la zona de expansión son sectores con la presencia de cobertura vegetal, un menor desarrollo industrial, baja densidad poblacional, escasez de edificaciones altas y con menores tasas de tráfico vehicular.

La nomenclatura UHI utilizada por Howard (1833) para describir los impactos de la urbanización en la atmósfera de la ciudad en Londres, Inglaterra, supone que la ciudad se desarrolla y organiza en un espacio donde los usos del suelo están muy bien definidos e identificados. Por otro lado, Roth (2007) ha enfatizado que los estudios de clima urbano en países tropicales pueden establecer una visión distintiva de la configuración UHI asociada con los países templados. De hecho, las áreas urbanas o semiurbanas en la ciudad de Cuenca son mixtas, lo que dificulta la clasificación de los usos del suelo. Tales características son típicas de los países en desarrollo que tienen particularidades en la génesis, organización y diseño de las ciudades. Las ciudades de países subdesarrollados como Ecuador, muestran un papel muy diferente en el equilibrio energético de la superficie en comparación con las ciudades de América del Norte, que Arnfield (2003) define como lugares cómodos con calles bien espaciadas, espacios verdes y grandes extensiones de parque públicos. La ciudad de Cuenca presenta áreas muy pobladas con poca o ninguna cubierta vegetal que repercute de manera directa en la elevación de temperaturas.

Estudios previos también se han centrado en analizar el fenómeno UHI en diferentes ciudades de Sudamérica como por ejemplo: en el Estado de Espírito Santo y Río de Janeiro en Brasil (dos Santos et al., 2017; Peres et al., 2018); Rosario en Argentina (Vega et al., 2019); en la ciudad de Valparaíso en Chile (Carrasco et al., 2017); en la ciudad de San Carlos en Venezuela (Gil, 2018); en Bogotá capital de



Colombia (Ramírez-Aguilar & Lucas Souza, 2019); en las áreas metropolitanas de Huancayo y Arequipa en Perú (Miguel et al., 2019); el presente trabajo contribuye a la literatura existente al proporcionar la caracterización de las zonas, dentro de la ciudad de Cuenca, que son susceptibles a los efectos de las islas de calor urbano en el periodo de evaluación 2013-2017. La metodología propuesta incluye la corrección de los efectos atmosféricos y emisividad para la recuperación de LST utilizando datos TIR de Landsat-8.

La caracterización del SUHI proporciona información sobre cómo las composiciones de la superficie terrestre gobiernan la dinámica del LST y los puntos críticos a escala local. Las correlaciones entre los índices de vegetación y LST mostraron que la vegetación y las superficies impermeables tienen fuertes efectos en SUHI. En general, el estudio ha encontrado que el SUHI está severamente influenciado por el uso de suelo. Por lo tanto, los planificadores urbanos deben prestar atención a las políticas futuras de uso de la tierra. Es imperativo destacar la importancia de ecologizar el medio ambiente en la planificación urbana debido a sus efectos de modificación en la temperatura de la superficie y el clima local en su conjunto.

Este estudio confirmó que la detección de cambios LST basada en datos TIR depende del ruido proveniente de nubes indetectables, sombras de nubes y aerosoles, y de la frecuencia de muestreo que se reduce en gran medida en un entorno tropical debido a la presencia de nubes (Peres et al., 2018). De hecho, las nubes aumentan el ruido y disminuyen la cantidad de imágenes disponibles. La dicotomía entre la resolución espacial y temporal es una restricción y debe tenerse en cuenta en los estudios de detección de cambios basados en LST en áreas urbanas. Los datos Landsat TIR permiten un análisis espacial LST adecuado sobre las áreas urbanas, pero una frecuencia de muestreo deficiente para caracterizar la variabilidad temporal LST, que las nubes pueden reducir aún más.

Finalmente, el estudio brinda información útil que puede ayudar a controlar los efectos de la urbanización no planificada en la ciudad de Cuenca, para así, proporcionar mejores condiciones ambientales urbanas para los habitantes y fomentar aún más el desarrollo urbano sostenible en las ciudades ecuatorianas.



## 9. LIMITACIONES DEL ESTUDIO

Durante el desarrollo de la investigación se identificaron algunas limitaciones. La disponibilidad continua de imágenes satelitales libre de nubosidad y correspondientes a un mismo periodo estacional fue el principal reto encontrado; aunque la misión Landsat proporcione información de la superficie de la Tierra desde 1972, los datos en condiciones óptimas son muy exigüos.

Desde la perspectiva de la teledetección, los datos de Landsat a través de la banda 10 entregan información térmica con una resolución de 120 m, lo cual si bien es una escala óptima de estudio no permite representar con precisión las características de SUHI, especialmente en áreas urbanas de alta densidad. Por otra parte, las imágenes que cubren la ciudad de Cuenca solo se capturaron durante la mañana cada 16 días; así, la baja resolución temporal de Landsat hace que no sea aplicable realizar análisis de tendencias a largo plazo. Además, la evaluación del SUHI nocturno no es posible en este estudio, debido a que no existen datos nocturnos provenientes de Landsat de manera gratuita.

La falta de inclusión de sensores que midan la temperatura superficial terrestre, en las estaciones meteorológicas del área de estudio, es una limitación muy representativa, puesto que no se pueden validar los resultados obtenidos de LST con información in situ. Por lo que se tiene que optar por métodos de validación alternativos, que si bien son aceptados dentro de la comunidad científica, los mismos presentan porcentajes de sesgos más elevados.

## 10. RECOMENDACIONES PARA ESTUDIOS FUTUROS

La escases de imágenes satelitales, debido al elevado contenido de nubosidad, no permite que se desarrollen estudio temporales a largo plazo; por lo que realizar investigaciones sobre la fusión de imágenes de diferentes satélites es un tema de suma importancia; el cual ya está siendo explorado principalmente por la necesidad de contar con un número significativo de imágenes para la valoración óptima de estudios relacionados con las islas de calor.

La emisividad es uno de los parámetros más importantes para el cálculo de LST, en el presente estudio se usó, para su derivación, el algoritmo propuesto por José A. Sobrino et al. (2008). El utilizar nuevas metodologías que permitan recuperar la emisividad puede mejorar los resultados obtenidos de LST. Parastatidis, Mitraka, Chrysoulakis, & Abrams (2017) expresa que por cada 1% de error presentado en la emisividad se obtiene un error de 1 °C; por lo tanto, el contar con nuevas formas de calcular la emisividad puede mejorar la precisión del cálculo de la temperatura superficial terrestre.

El LST también se puede recuperar en base a mediciones pasivas de microondas, pero con una resolución espacial más alta y menos precisión debido al rango de emisividad en el microondas. Por otro lado, las mediciones de microondas son menos sensibles a la contaminación de las nubes que TIR, lo que permite la recuperación de LST en prácticamente todas las condiciones climáticas. Las nubes limitan el muestreo de espacio-tiempo de las mediciones LST y el conjunto de datos LST obtenido está sesgado, ya que toda observación debe realizarse en condiciones de cielo despejado. Los métodos híbridos que aprovechan las mediciones de TIR y microondas son un tema prometedor para futuros estudios que intentan recuperar LST con una precisión razonable y una resolución espacial fina en condiciones nubladas. Además, se requieren estudios futuros que aborden problemas de validación y la dependencia angular de LST para mejorar la recuperación de LST de los datos de teledetección.

## 11. REFERENCIAS

- Abaas, Z. R. (2020). Impact of development on Baghdad's urban microclimate and human thermal comfort. *Alexandria Engineering Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.12.040>
- Adeyeri, O. E., Akinsanola, A. A., & Ishola, K. A. (2017). Investigating surface urban heat island characteristics over Abuja, Nigeria: Relationship between land surface temperature and multiple vegetation indices. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 7, 57–68. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2017.06.005>
- Amanollahi, J., Tzanis, C., Ramli, M. F., & Abdullah, A. M. (2016). Urban heat evolution in a tropical area utilizing Landsat imagery. *Atmospheric Research*, 167, 175–182. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.07.019>
- Arnfield, A. J. (2003). REVIEW TWO DECADES OF URBAN CLIMATE RESEARCH : A REVIEW OF TURBULENCE , EXCHANGES OF ENERGY AND WATER , AND THE URBAN HEAT ISLAND, 26, 1–26. <https://doi.org/10.1002/joc.859>
- Baghdadi, N., & Mehrez Zribi. (2016). *Land Surface Remote Sensing in Urban and Coastal Areas*. *Land Surface Remote Sensing in Urban and Coastal Areas*. <https://doi.org/10.1016/c2016-0-00237-1>
- Balestrini, M. (2008). *Cómo se elabora el proyecto de investigación*. BL Consultores Asociados. (Vol. (BL Consul). Retrieved from <https://es.scribd.com/doc/158963693/Como-Se-Elabora-El-Proyecto-de-Investigacion-Balestrini-7ma>
- Ballinas, M., & Barradas, V. L. (2016). The urban tree as a tool to mitigate the urban heat island in Mexico City: A simple phenomenological model. *Journal of Environmental Quality*, 45(1), 157–166. <https://doi.org/10.2134/jeq2015.01.0056>
- Baño, D., Salazar, J., & Delgado, M. (2018). Percepción Remota en el Diseño de Estrategias de planificación Urbana, Caso de Estudio Isla De Calor Urbano del Distrito Metropolitano de Quito. *LATIN AMERICAN JOURNAL OF COMPUTING*, V(1), 17–26.
- Barsi, J. A., Schott, J. R., Hook, S. J., Raqueno, N. G., Markham, B. L., & Radocinski, R. G. (2014). Landsat-8 thermal infrared sensor (TIRS) vicarious radiometric calibration. *Remote Sensing*, 6(11), 11607–11626. <https://doi.org/10.3390/rs6111607>
- Bechtel, B., Demuzere, M., Mills, G., Zhan, W., Sismanidis, P., Small, C., & Voogt, J. (2019). SUHI analysis using Local Climate Zones—A comparison of 50 cities. *Urban Climate*, 28(July 2018), 100451. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.01.005>
- Bernard, J., Musy, M., Calmet, I., Bocher, E., & Keravec, P. (2017). Urban heat island temporal and spatial variations: Empirical modeling from geographical and meteorological data. *Building and Environment*, 125, 423–438. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.08.009>
- Buck, A. L. (1981). New equations for computing vapour pressure and enhancement factor. *Journal of Applied Meteorology*. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1981\)020<1527:nefcvp>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1981)020<1527:nefcvp>2.0.co;2)
- Campoverde, A. S. B. (2018). Analysis of the urban heat island in the Andean environment of Cuenca-Ecuador. *Investigaciones Geograficas*, (70), 167–179. <https://doi.org/10.14198/INGEO2018.70.08>
- Camps-Valls, G., Tuia, D., Gómez-Chova, L., Jiménez, S., & Malo, J. (2011). Remote Sensing Image Processing. *Synthesis Lectures on Image, Video, and Multimedia Processing*, 5(1), 1–192. <https://doi.org/10.2200/S00392ED1V01Y201107IVM012>

- Carlson, T. N. (1986). Regional-scale estimates of surface moisture availability and thermal inertia using remote thermal measurements. *Remote Sensing Reviews*, 1(2), 197–247. <https://doi.org/10.1080/02757258609532069>
- Carnahan, W. H., & Larson, R. C. (1990). An analysis of an urban heat sink. *Remote Sensing of Environment*, 33(1), 65–71. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(90\)90056-R](https://doi.org/10.1016/0034-4257(90)90056-R)
- Carrasco, C., Palme, M., Angel Galvez, M., Inostroza, L., Padilla, U., & Fonseca, A. (2017). Urban Heat Island of Valparaíso, Chile - A Comparison between 2007 and 2016. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 245(7), 0–10. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/7/072036>
- Caselles, V., López García, M. J., Meliá, J., & Pérez Cueva, A. J. (1991). Analysis of the heat-island effect of the city of Valencia, Spain, through air temperature transects and NOAA satellite data. *Theoretical and Applied Climatology*, 43(4), 195–203. <https://doi.org/10.1007/BF00867455>
- Chang, N.-B. (2018). *Multisensor Data Fusion and Machine Learning for Environmental Remote Sensing*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315154602>
- Chatterjee, S., Khan, A., Dinda, A., Mithun, S., Khatun, R., Akbari, H., ... Wang, Y. (2019). Simulating micro-scale thermal interactions in different building environments for mitigating urban heat islands. *Science of the Total Environment*, 663, 610–631. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.299>
- Chen, F., Yang, S., Yin, K., & Chan, P. (2017). Challenges to quantitative applications of Landsat observations for the urban thermal environment. *Journal of Environmental Sciences*, 59, 80–88. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.02.009>
- Cheshmehzangi, A., & Butters, C. (2018). *Designing Cooler Cities*. (A. Cheshmehzangi & C. Butters, Eds.). Singapore: Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-6638-2>
- Chrysoulakis, N., de Castro, E. A., & Moors, E. J. (2015). *Understanding Urban Metabolism: A Tool for Urban Planning*. Retrieved from <https://books.google.com/books?id=DqReBAAAQBAJ&pgis=1>
- Cole, D., Dietsch, N., Gero, G., Hitchcock, D., Lewis, M., Magee, J., ... Zalph, B. (2008). Heat Island Reduction Activities. *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies*, 1–23.
- Cordero, X., & Guillén, V. (2013). Diseño y validación de vivienda bioclimática para la ciudad de Cuenca Introducción : *Estoa*, 2(2), 61–75. Retrieved from <https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/estoa/article/viewFile/303/256>
- Danodia, A., Nikam, B. R., Kumar, S., & Patel, N. R. (2017). Land surface temperature retrieval by radiative transfer equation and single channel algorithms using landsat-8 satellite data. *38th Asian Conference on Remote Sensing - Space Applications: Touching Human Lives, ACRS 2017, 2017-October*(October).
- Deilami, K., Kamruzzaman, M., & Liu, Y. (2018). Urban heat island effect: A systematic review of spatio-temporal factors, data, methods, and mitigation measures. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 67(November 2017), 30–42. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.12.009>
- Dewan, A., & Corner, R. (2013). *Dhaka Megacity*. *Dhaka Megacity*. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-6735-5>

- dos Santos, A. R., de Oliveira, F. S., da Silva, A. G., Gleriani, J. M., Gonçalves, W., Moreira, G. L., ... Mota, P. H. S. (2017a). Spatial and temporal distribution of urban heat islands. *Science of the Total Environment*, 605–606, 946–956. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.275>
- dos Santos, A. R., de Oliveira, F. S., da Silva, A. G., Gleriani, J. M., Gonçalves, W., Moreira, G. L., ... Mota, P. H. S. (2017b). Spatial and temporal distribution of urban heat islands. *Science of the Total Environment*, 605–606, 946–956. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.275>
- Elizondo-Martínez, E. J., Andrés-Valeri, V. C., Jato-Espino, D., & Rodriguez-Hernandez, J. (2020). Review of porous concrete as multifunctional and sustainable pavement. *Journal of Building Engineering*, 27(May 2019). <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100967>
- Evans, J. D. (1996). *Straightforward statistics for the behavioral sciences*. Thomson Brooks/Cole Publishing Co.
- Feng, Y., Gao, C., Tong, X., Chen, S., Lei, Z., & Wang, J. (2019). Spatial patterns of land surface temperature and their influencing factors: A case study in Suzhou, China. *Remote Sensing*, 11(2). <https://doi.org/10.3390/rs11020182>
- Ferwati, S., Skelhorn, C., Shandas, V., Voelkel, J., Shawish, A., & Ghanim, M. (2017). Analysis of urban heat in a corridor environment - The case of Doha, Qatar. *Urban Climate*, (April), 0–1. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.08.008>
- Gallo, K. P., Tarpley, J. D., McNab, A. L., & Karl, T. R. (1995). Assessment of urban heat islands: a satellite perspective. *Atmospheric Research*, 37(1–3), 37–43. [https://doi.org/10.1016/0169-8095\(94\)00066-M](https://doi.org/10.1016/0169-8095(94)00066-M)
- Gartland, L. (2012). *Heat Islands: Understanding and mitigating heat in urban areas. Heat Islands: Understanding and Mitigating Heat in Urban Areas* (Vol. 9781849771). <https://doi.org/10.4324/9781849771559>
- Gil, E. H. (2018). Estimación de la temperatura superficial en San Carlos- Estado Cojedes, Venezuela empleando sensores remotos. *Multiciencias*, 16(4), 363–368.
- Gu, Y., & Li, D. (2017). A modeling study of the sensitivity of urban heat islands to precipitation at climate scales. *Urban Climate*, (April), 0–1. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.12.001>
- Guha, S., Govil, H., Dey, A., & Gill, N. (2018). Analytical study of land surface temperature with NDVI and NDBI using Landsat 8 OLI and TIRS data in Florence and Naples city , Italy. *European Journal of Remote Sensing*, 51(1), 667–678. <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1474494>
- Guillén, V. (2016). UN ACERCAMIENTO A CARACTERIZAR LA ISLA DE CALOR EN CUENCA, ECUADOR, (November).
- Hardin, A. W., Liu, Y., Cao, G., & Vanos, J. K. (2017). Urban heat island intensity and spatial variability by synoptic weather type in the northeast US. *Urban Climate*, (September), 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.09.001>
- Hazra, S., Mukhopadhyay, A., Ghosh, A. R., Mitra, D., & Dadhwal, V. K. (2017). *Environment and Earth Observation*. (S. Hazra, A. Mukhopadhyay, A. R. Ghosh, D. Mitra, & V. K. Dadhwal, Eds.). Cham: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-46010-9>
- Hendel, M., Parison, S., Grados, A., & Royon, L. (2018). Which pavement structures are best suited to limiting the UHI effect? A laboratory-scale study of Parisian pavement structures. *Building and Environment*, 144, 216–229. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.08.027>

- Hishe, S., Lyimo, J., & Bewket, W. (2017). Effects of soil and water conservation on vegetation cover : a remote sensing based study in the Middle Suluh River Basin , northern Ethiopia. *Environmental Systems Research*. <https://doi.org/10.1186/s40068-017-0103-8>
- Hong, S.-K., Nakagoshi, N., Fu, B., & Morimoto, Y. (Eds.). (2007). *Landscape Ecological Applications in Man-Influenced Areas. Landscape Ecological Applications in Man-Influenced Areas*. Dordrecht: Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/1-4020-5488-2>
- Howard, L. (1833). *The Climate of London: Deduced from Meteorological Observations Made in the Metropolis and at Various Places Around it*. London. <https://doi.org/10.2307/1793062>
- Hu, D., Meng, Q., Zhang, L., & Zhang, Y. (2020). Spatial quantitative analysis of the potential driving factors of land surface temperature in different “Centers” of polycentric cities: A case study in Tianjin, China. *Science of the Total Environment*, 706, 135244. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135244>
- Huang, C., Lyhyaoui, A., Guofang, Z., & Benhayoun, N. (2015). *Emerging Economies, Risk and Development, and Intelligent Technology*.
- Huete, A. . (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 295–309. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)
- Imhoff, M. L., Zhang, P., Wolfe, R. E., & Bounoua, L. (2010). Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA. *Remote Sensing of Environment*, 114(3), 504–513. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.10.008>
- Jamei, Y., Rajagopalan, P., & Sun, Q. (Chayn). (2019). Spatial structure of surface urban heat island and its relationship with vegetation and built-up areas in Melbourne, Australia. *Science of the Total Environment*, 659, 1335–1351. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.308>
- Jami Aymacaña, J. L., Mora Paspuezán, M. B., Padilla Almeida, O., & Kirby Powney, E. P. (2018). Análisis de la presencia de islas de calor en el Cantón Rumiñahui mediante el tratamiento de imágenes Landsat 7 ETM+. *Congreso de Ciencia y Tecnología ESPE*, 13(1), 95–111. <https://doi.org/10.24133/ctespe.v13i1.634>
- Jandaghian, Z., Touchaei, A. G., & Akbari, H. (2017). Sensitivity analysis of physical parameterizations in WRF for urban climate simulations and heat island mitigation in Montreal. *Urban Climate*, (October 2016), 0–1. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.10.004>
- Jian Guo Liu, philippa J. M. (2016). *Image processing and GIS for remote Sensing Techniques and applications. Department of Earth Science and Engineering, Imperial College London* (Vol. 91).
- Jiménez-Muñoz, J. C., & Sobrino, J. A. (2003). A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, 108(22). <https://doi.org/10.1029/2003JD003480>
- Kaufman, Y. J., Wald, A. E., Remer, L. A., Gao, B. C., Li, R. R., & Flynn, L. (1997). MODIS 2.1- $\mu\text{m}$  channel - correlation with visible reflectance for use in remote sensing of aerosol. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(5), 1286–1298. <https://doi.org/10.1109/36.628795>
- Kaye, N. B., & Flynn, M. R. (2012). *Handbook of Environmental Fluid Dynamics*. <https://doi.org/10.1201/b14241>



- Kikon, N., Singh, P., Singh, S. K., & Vyas, A. (2016). Assessment of urban heat islands (UHI) of Noida City, India using multi-temporal satellite data. *Sustainable Cities and Society*, 22, 19–28. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.01.005>
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), 259–263. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>
- Kunkel, K. E., Changnon, S. A., Reinke, B. C., & Arritt, R. W. (1996). The July 1995 heat wave in the midwest: A climatic perspective and critical weather factors. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(7), 1507–1518. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<1507:TJHWIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<1507:TJHWIT>2.0.CO;2)
- Lehoczy, A., Sobrino, J., Skoković, D., & Aguilar, E. (2017). The Urban Heat Island Effect in the City of Valencia: A Case Study for Hot Summer Days. *Urban Science*, 1(1), 9. <https://doi.org/10.3390/urbansci1010009>
- Li, H. (2015). *Pavement Materials for Heat Island Mitigation: Design and Management Strategies*. *Pavement Materials for Heat Island Mitigation: Design and Management Strategies*. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-04185-8>
- Li, Z. L., Tang, B. H., Wu, H., Ren, H., Yan, G., Wan, Z., ... Sobrino, J. A. (2013). Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives. *Remote Sensing of Environment*, 131, 14–37. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.12.008>
- Madanian, M., Soffianian, A. R., Soltani Koupai, S., Pourmanafi, S., & Momeni, M. (2018). The study of thermal pattern changes using Landsat-derived land surface temperature in the central part of Isfahan province. *Sustainable Cities and Society*, 39(May 2017), 650–661. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.03.018>
- Marchioni, M., & Becciu, G. (2015). Experimental results on permeable pavements in urban areas: A synthetic review. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 10(6), 806–817. <https://doi.org/10.2495/SDP-V10-N6-806-817>
- Mathew, A., Khandelwal, S., & Kaul, N. (2018). Analysis of diurnal surface temperature variations for the assessment of surface urban heat island effect over Indian cities. *Energy and Buildings*, 159, 271–295. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.062>
- Meng, Q., Zhang, L., Sun, Z., Meng, F., Wang, L., & Sun, Y. (2018a). Characterizing spatial and temporal trends of surface urban heat island effect in an urban main built-up area: A 12-year case study in Beijing, China. *Remote Sensing of Environment*, 204(September 2017), 826–837. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.09.019>
- Meng, Q., Zhang, L., Sun, Z., Meng, F., Wang, L., & Sun, Y. (2018b). Characterizing spatial and temporal trends of surface urban heat island effect in an urban main built-up area: A 12-year case study in Beijing, China. *Remote Sensing of Environment*, 204(November 2016), 826–837. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.09.019>
- Miguel, J., Suazo, A., Luis, J., Rojas, F., Karam, H. A., Mallma, G. R. A., & Vasquez, R. J. A. (2019). Isla de Calor Urbana Superficial en las Áreas Metropolitanas de Huancayo y Arequipa/Perú. *Anuário Do Instituto de Geociências - UFRJ*, 42, 197–207.
- Montanaro, M., Gerace, A., Lunsford, A., & Reuter, D. (2014). Stray light artifacts in imagery from the landsat 8 thermal infrared sensor. *Remote Sensing*, 6(11), 10435–10456. <https://doi.org/10.3390/rs61110435>



- Nowak, D., & Dwyer, J. (2000). Understanding the Benefits and Costs of Urban Forest Ecosystems. *Handbook of Urban and Community Forestry in the Northeast*.
- Ochola, E. M., Fakhazadehshirazi, E., Adimo, A. O., Mukundi, J. B., Wesonga, J. M., & Sodoudi, S. (2020). Inter-local climate zone differentiation of land surface temperatures for Management of Urban Heat in Nairobi City, Kenya. *Urban Climate*, 31(March 2019), 100540. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100540>
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). *Urban Climates*. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781139016476>
- Palme, M., Villacreses, G., Lobato, A., Cordovez, M., Macias, J., & Soriano, G. (2016). Estimating the Urban Heat Island Effect in the City of Guayaquil. *An International Conference on Urban Physics*, (September), 26–30.
- Parastatidis, D., Mitraka, Z., Chrysoulakis, N., & Abrams, M. (2017). Online global land surface temperature estimation from landsat. *Remote Sensing*, 9(12), 1–16. <https://doi.org/10.3390/rs9121208>
- Peres, L. de F., Lucena, A. J. de, Rotunno Filho, O. C., & França, J. R. de A. (2018). The urban heat island in Rio de Janeiro, Brazil, in the last 30 years using remote sensing data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 64(September 2017), 104–116. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.08.012>
- Pirasteh, S., & Li, J. (2017). *Global changes and natural disaster management: Geo-information technologies. Global Changes and Natural Disaster Management: Geo-information Technologies*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-51844-2>
- Polydoros, A., & Cartalis, C. (2015). Assessing the impact of urban expansion to the state of thermal environment of peri-urban areas using indices. *Urban Climate*, 14, 166–175. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.10.004>
- Pradhan, B. (2017). *Spatial modeling and assessment of urban form: Analysis of urban growth: From sprawl to compact using geospatial data. Spatial Modeling and Assessment of Urban Form: Analysis of Urban Growth: From Sprawl to Compact Using Geospatial Data*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-54217-1>
- Price, J. C. (1979). Assessment of the urban heat island effect through the use of satellite data. *Monthly Weather Review*. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1979\)107<1554:AOTUHI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1979)107<1554:AOTUHI>2.0.CO;2)
- Qian, Y. G., Li, Z. L., & Nerry, F. (2013). Evaluation of land surface temperature and emissivities retrieved from MSG/SEVIRI data with MODIS land surface temperature and emissivity products. *International Journal of Remote Sensing*, 34(9–10), 3140–3152. <https://doi.org/10.1080/01431161.2012.716538>
- Qin, Y. (2015). A review on the development of cool pavements to mitigate urban heat island effect. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 445–459. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.177>
- Qin, Z., Karnieli, A., & Berliner, P. (2001). A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region. *International Journal of Remote Sensing*, 22(18), 3719–3746. <https://doi.org/10.1080/01431160010006971>

- Ramakreshnan, L., Aghamohammadi, N., Fong, C. S., Ghaffarianhoseini, A., Ghaffarianhoseini, A., Wong, L. P., ... Sulaiman, N. M. (2018a). A critical review of urban heat island phenomenon in the context of greater Kuala Lumpur, Malaysia. *Sustainable Cities and Society*. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.02.005>
- Ramakreshnan, L., Aghamohammadi, N., Fong, C. S., Ghaffarianhoseini, A., Ghaffarianhoseini, A., Wong, L. P., ... Sulaiman, N. M. (2018b). A critical review of Urban Heat Island phenomenon in the context of Greater Kuala Lumpur, Malaysia. *Sustainable Cities and Society*, 39(January), 99–113. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.02.005>
- Ramírez-Aguilar, E. A., & Lucas Souza, L. C. (2019). Urban form and population density: Influences on Urban Heat Island intensities in Bogotá, Colombia. *Urban Climate*, 29(May), 100497. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100497>
- Rao, P. K. (1972). Remote sensing of urban "heat islands" from an environmental satellite. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 53(7), 647–648.
- Rasilla, D., Allende, F., Martilli, A., & Fernández, F. (2019). Heat waves and human well-being in Madrid (Spain). *Atmosphere*, 10(5), 1–21. <https://doi.org/10.3390/atmos10050288>
- Ricardo D. Lopez, R. C. F. (2017). *Remote Sensing for Landscape Ecology: New Metric Indicators*. Retrieved from <https://www.routledge.com/Remote-Sensing-for-Landscape-Ecology-New-Metric-Indicators-2nd-Edition/Lopez-Frohn/p/book/9781315152714>
- Roth, M. (2007). Review of urban climate research in (sub)tropical regions. *International Journal of Climatology*, 27(14), 1859–1873. <https://doi.org/10.1002/joc.1591>
- Sahana, M., Ahmed, R., & Sajjad, H. (2016). Analyzing land surface temperature distribution in response to land use/land cover change using split window algorithm and spectral radiance model in Sundarban Biosphere Reserve, India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2(2). <https://doi.org/10.1007/s40808-016-0135-5>
- Sen, S., & Roesler, J. (2019). Thermal and optical characterization of asphalt field cores for microscale urban heat island analysis. *Construction and Building Materials*, 217, 600–611. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.091>
- SENPLADES. (2018). PROYECCIONES Y ESTUDIOS DEMOGRÁFICOS. Retrieved from <https://sni.gob.ec/proyecciones-y-estudios-demograficos>
- Shen, H., Huang, L., Zhang, L., Wu, P., & Zeng, C. (2016). Long-term and fine-scale satellite monitoring of the urban heat island effect by the fusion of multi-temporal and multi-sensor remote sensed data: A 26-year case study of the city of Wuhan in China. *Remote Sensing of Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.005>
- Sheng, L., Tang, X., You, H., Gu, Q., & Hu, H. (2017). Comparison of the urban heat island intensity quantified by using air temperature and Landsat land surface temperature in Hangzhou, China. *Ecological Indicators*, 72, 738–746. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.09.009>
- Shi, Y., Katzschner, L., & Ng, E. (2018). Modelling the fine-scale spatiotemporal pattern of urban heat island effect using land use regression approach in a megacity. *Science of the Total Environment*, 618, 891–904. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.252>
- Silva, J. S., Silva, R. M. da, & Santos, C. A. G. (2018). Spatiotemporal impact of land use/land cover changes on urban heat islands: A case study of Paço do Lumiar, Brazil. *Building and Environment*, 136, 279–292. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.041>

- Simwanda, M., Ranagalage, M., Estoque, R. C., & Murayama, Y. (2019). Spatial Analysis of Surface Urban Heat Islands in Four Rapidly Growing African Cities. *Remote Sensing*, 11(14), 1645. <https://doi.org/10.3390/rs11141645>
- Singh, P., Kikon, N., & Verma, P. (2017). Impact of land use change and urbanization on urban heat island in Lucknow city, Central India. A remote sensing based estimate. *Sustainable Cities and Society*, 32, 100–114. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.02.018>
- Sobrino, J. A., Oltra-Carrió, R., Sòria, G., Bianchi, R., & Paganini, M. (2012). Impact of spatial resolution and satellite overpass time on evaluation of the surface urban heat island effects. *Remote Sensing of Environment*, 117, 50–56. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.04.042>
- Sobrino, José A., Jiménez-Muñoz, J. C., Sòria, G., Romaguera, M., Guanter, L., Moreno, J., ... Martínez, P. (2008). Land surface emissivity retrieval from different VNIR and TIR sensors. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(2), 316–327. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.904834>
- Soltani, A., & Sharifi, E. (2017). Daily variation of urban heat island effect and its correlations to urban greenery: A case study of Adelaide. *Frontiers of Architectural Research*, 6(4), 529–538. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2017.08.001>
- Swamy, G., Shiva Nagendra, S. M., & Schlink, U. (2017). Urban Heat Island (UHI) influence on secondary pollutant formation in a tropical humid environment. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 67(10), 1080–1091. <https://doi.org/10.1080/10962247.2017.1325417>
- Takebayashi, H. (2015). *Improvement measures of urban thermal environment*. SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-13785-8\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-13785-8_1)
- Tang, B. H., Shao, K., Li, Z. L., Wu, H., Nerry, F., & Zhou, G. (2015). Estimation and validation of land surface temperatures from chinese second-generation polar-orbit FY-3A VIRR data. *Remote Sensing*, 7(3), 3250–3273. <https://doi.org/10.3390/rs70303250>
- Tang, H., & Li, Z.-L. (2013). *Quantitative Remote Sensing in Thermal Infrared: Theory and Applications*.
- Thenkabail, P. S. (2015). *Remotely Sensed Data Characterization, Classification, and Accuracies*. <https://doi.org/10.1201/b19294>
- Tran, H., Uchiyama, D., Ochi, S., & Yasuoka, Y. (2006). Assessment with satellite data of the urban heat island effects in Asian mega cities. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 8(1), 34–48. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2005.05.003>
- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127–150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)
- Ullah, S., Ahmad, K., Sajjad, R. U., Abbasi, A. M., Nazeer, A., & Tahir, A. A. (2019). Analysis and simulation of land cover changes and their impacts on land surface temperature in a lower Himalayan region. *Journal of Environmental Management*, 245(April), 348–357. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.063>
- United Nations. (2018). *World Urbanization Prospects : The 2018 Revision*.
- USGS. (2018). LANDSAT 7 (L7) DATA USERS HANDBOOK. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, 7(June). Retrieved from [https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/LSDS-1927\\_L7\\_Data\\_Users\\_Handbook.pdf](https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/LSDS-1927_L7_Data_Users_Handbook.pdf)

- USGS. (2019). LANDSAT 8 (L8) DATA USERS HANDBOOK. *Department of the Interior, U.S. Geological Survey*, 4(April). Retrieved from [https://prd-wret.s3-us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/LSDS-1574\\_L8\\_Data\\_Users\\_Handbook\\_v4.0.pdf](https://prd-wret.s3-us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/LSDS-1574_L8_Data_Users_Handbook_v4.0.pdf)
- Vani, V. (2017). COMPARATIVE STUDY OF NDVI AND SAVI VEGETATION INDICES IN ANANTAPUR DISTRICT SEMI-ARID AREAS. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCET)*, 8(4), 559–566.
- Vega, M., Cespedes, L., Lombardo, F., Re, G., Garcia, N., Busnelli, A., ... Piacentini, R. (2019). Measurements and Modelization of the Rosario City Heat Island, Argentina - Preliminary Results. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 471(9). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/471/9/092088>
- Voogt, J. A., & Oke, T. R. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86(3), 370–384. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8)
- Vukovich, F. M. (1983). An analysis of the ground temperature and reflectivity pattern about St. Louis, Missouri, using HCMM satellite data. *Journal of Climate & Applied Meteorology*. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1983\)022<0560:AAOTGT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1983)022<0560:AAOTGT>2.0.CO;2)
- Wan, Z. (2014). New refinements and validation of the collection-6 MODIS land-surface temperature/emissivity product. *Remote Sensing of Environment*, 140, 36–45. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.027>
- Wang, J., Huang, B., Fu, D., & Atkinson, P. M. (2015). Spatiotemporal variation in surface urban heat island intensity and associated Determinants across major Chinese cities. *Remote Sensing*, 7(4), 3670–3689. <https://doi.org/10.3390/rs70403670>
- Wang, M., Zhang, Z., He, G., Wang, G., Long, T., & Peng, Y. (2016). An enhanced single-channel algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat series data. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 4211–4232. <https://doi.org/10.1002/2015JD024358>.Received
- Wang, M., Zhang, Z., Hu, T., & Liu, X. (2019). A Practical Single-Channel Algorithm for Land Surface Temperature Retrieval: Application to Landsat Series Data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(1), 299–316. <https://doi.org/10.1029/2018JD029330>
- Wang, Y., Du, H., Xu, Y., Lu, D., Wang, X., & Guo, Z. (2018). Temporal and spatial variation relationship and influence factors on surface urban heat island and ozone pollution in the Yangtze River Delta, China. *Science of the Total Environment*, 631–632(2), 921–933. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.050>
- Weng, Q., Quattrochi, D., & Gamba, P. (2018). *Urban Remote Sensing. Urban Remote Sensing, Second Edition*.
- Wolf, K. L. (1998). Urban Nature Benefits: Psycho-Social Dimensions of People and Plants. *Center for Urban Horitculture, University of Washington, College of Forest Resources*, 1–2.
- Xie, N., Li, H., Abdelhady, A., & Harvey, J. (2019). Laboratorial investigation on optical and thermal properties of cool pavement nano-coatings for urban heat island mitigation. *Building and Environment* (Vol. 147). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.017>
- Yadav, N., Sharma, C., Peshin, S. K., & Masiwal, R. (2017). Study of intra-city urban heat island intensity and its influence on atmospheric chemistry and energy consumption in Delhi. *Sustainable Cities and Society*, 32(January), 202–211. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.04.003>

- Yao, R., Wang, L., Huang, X., Gong, W., & Xia, X. (2019). Greening in Rural Areas Increases the Surface Urban Heat Island Intensity. *Geophysical Research Letters*, 46(4), 2204–2212. <https://doi.org/10.1029/2018GL081816>
- Yao, R., Wang, L., Huang, X., Niu, Y., Chen, Y., & Niu, Z. (2018). The influence of different data and method on estimating the surface urban heat island intensity. *Ecological Indicators*, 89(September 2017), 45–55. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.01.044>
- Young, N. E., Anderson, R. S., Chignell, S. M., Vorster, A. G., Lawrence, R., & Evangelista, P. H. (2017). A survival guide to Landsat preprocessing. *Ecology*, 98(4), 920–932. <https://doi.org/10.1002/ecy.1730>
- Zeman, F. (2012). *Metropolitan sustainability: Understanding and improving the urban environment. Metropolitan Sustainability: Understanding and Improving the Urban Environment*. <https://doi.org/10.1533/9780857096463>
- Zha, Y., Gao, J., & Ni, S. (2003). Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 24(3), 583–594.
- Zhang, Y., Yu, T., Gu, X., Zhang, Y., & Chen, L. (2006). Land surface temperature retrieval from CBERS-02 IRMSS thermal infrared data and its applications in quantitative analysis of urban heat island effect. *JOURNAL OF REMOTE SENSING-BEIJING-*, 10(5), 789.
- Zhou, B., Lauwaet, D., Hooyberghs, H., De Ridder, K., Kropp, J. P., & Rybski, D. (2016). Assessing seasonality in the surface urban heat island of London. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 55(3), 493–505. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-15-0041.1>
- Zhou, D., Bonafoni, S., Zhang, L., & Wang, R. (2018). Remote sensing of the urban heat island effect in a highly populated urban agglomeration area in East China. *Science of the Total Environment*, 628–629(219), 415–429. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.074>

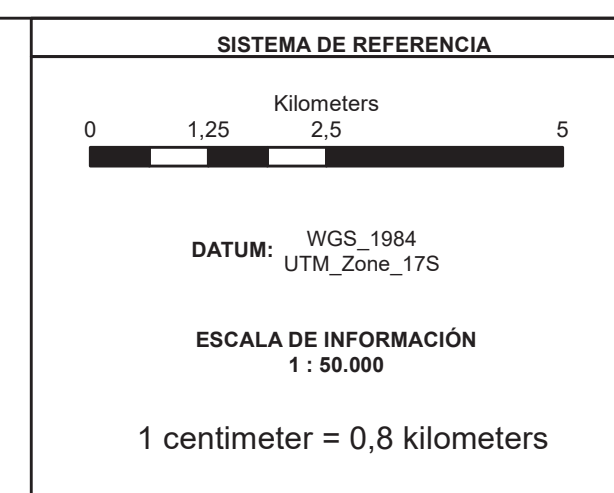
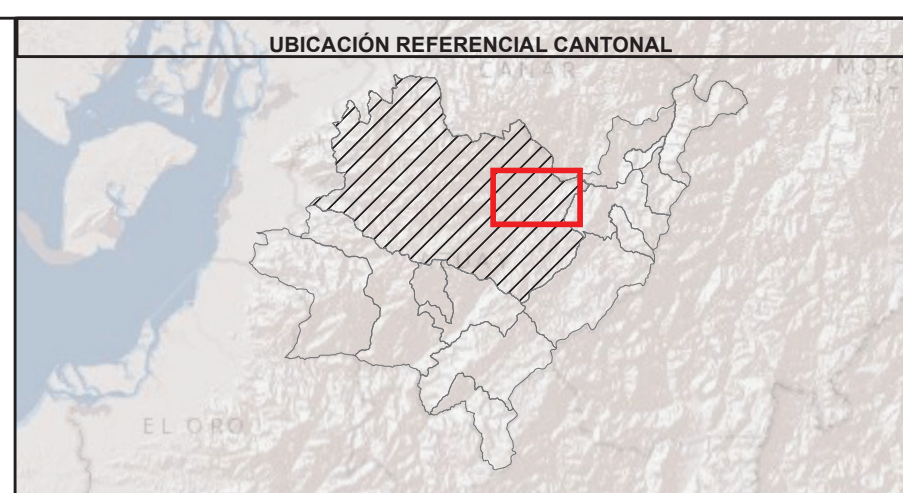
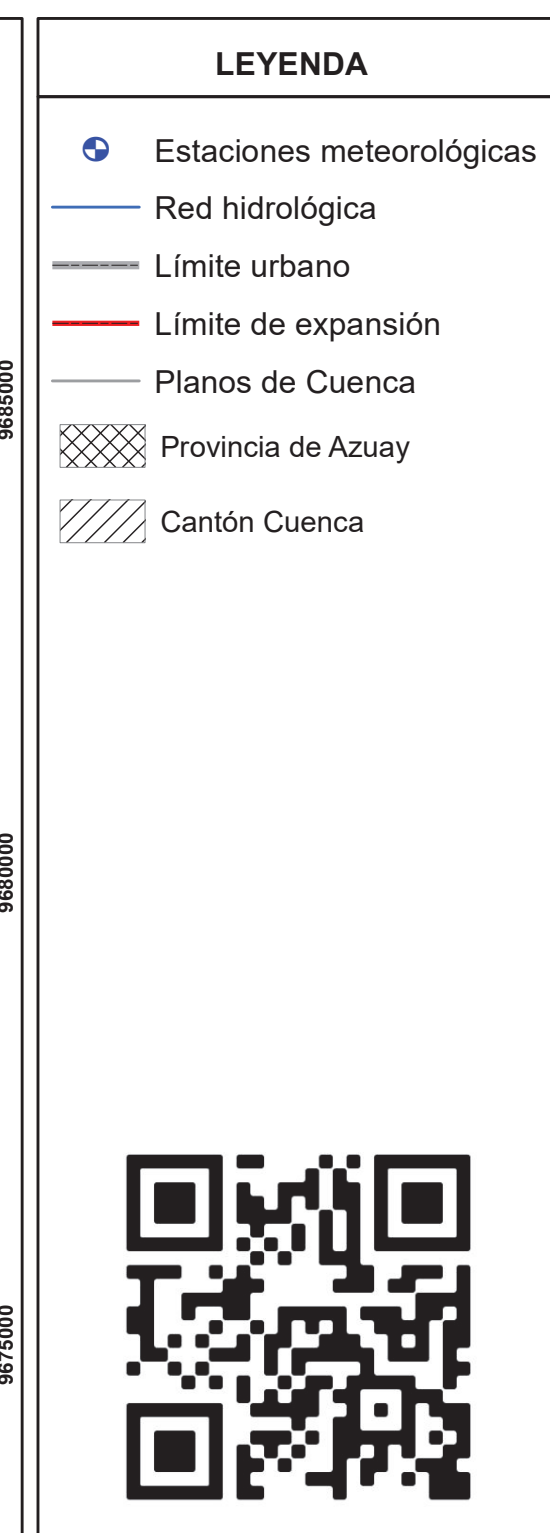


## 12. APÉNDICES

### Apéndice 1: Información Cartográfica

## Apéndice 1.1: Área de estudio





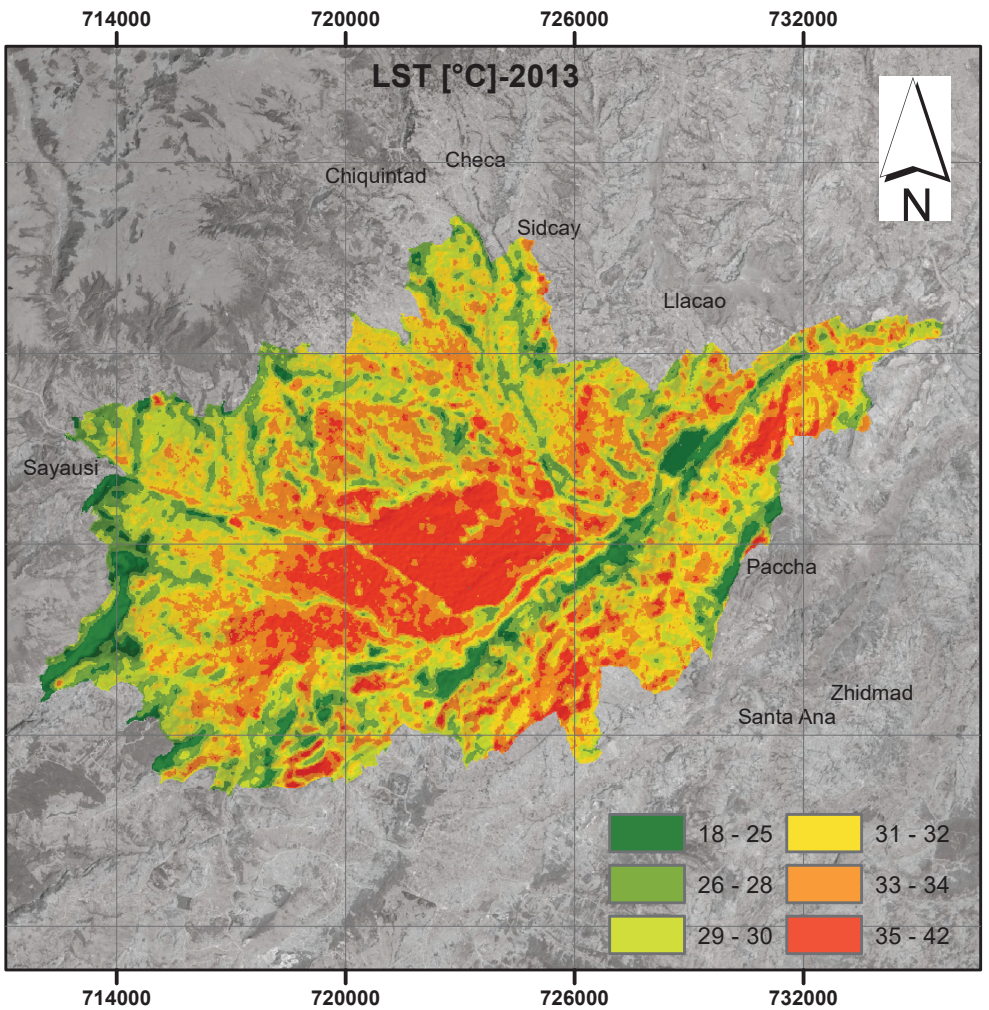
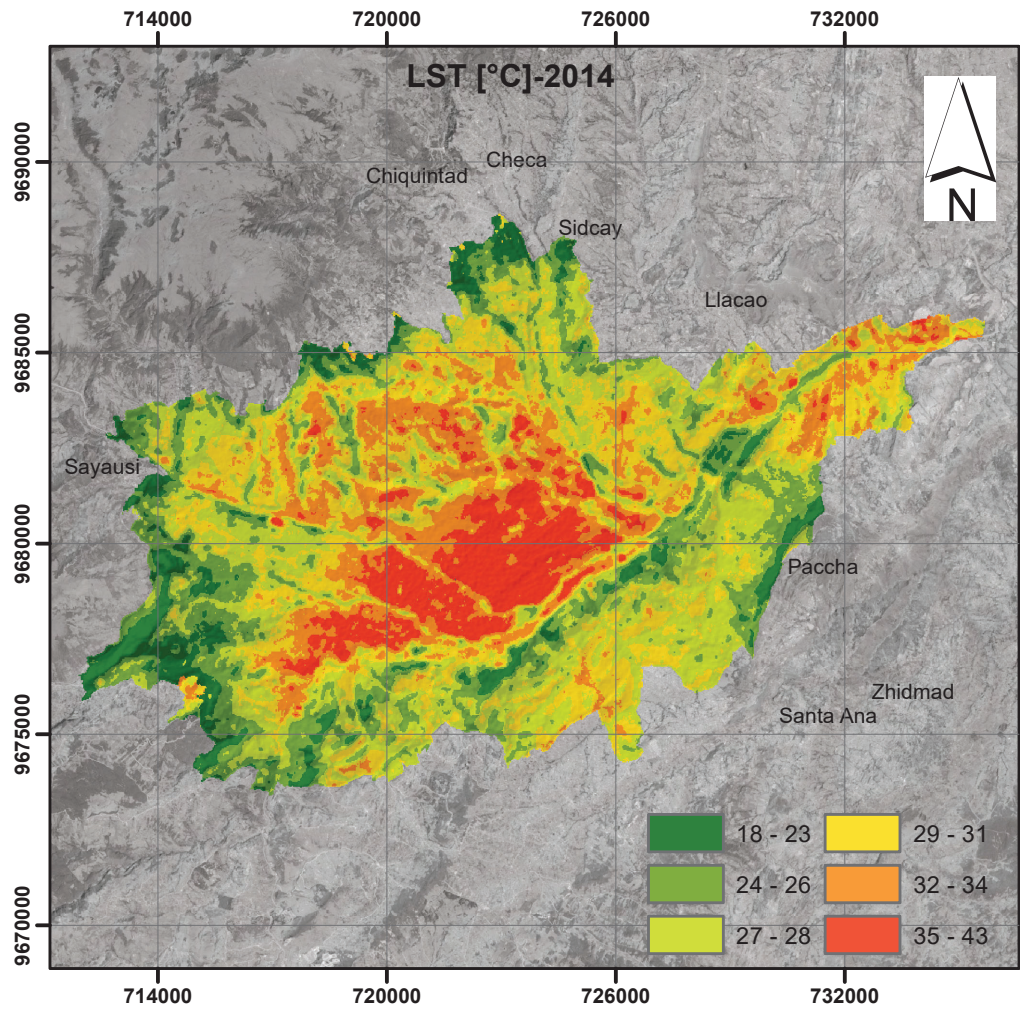
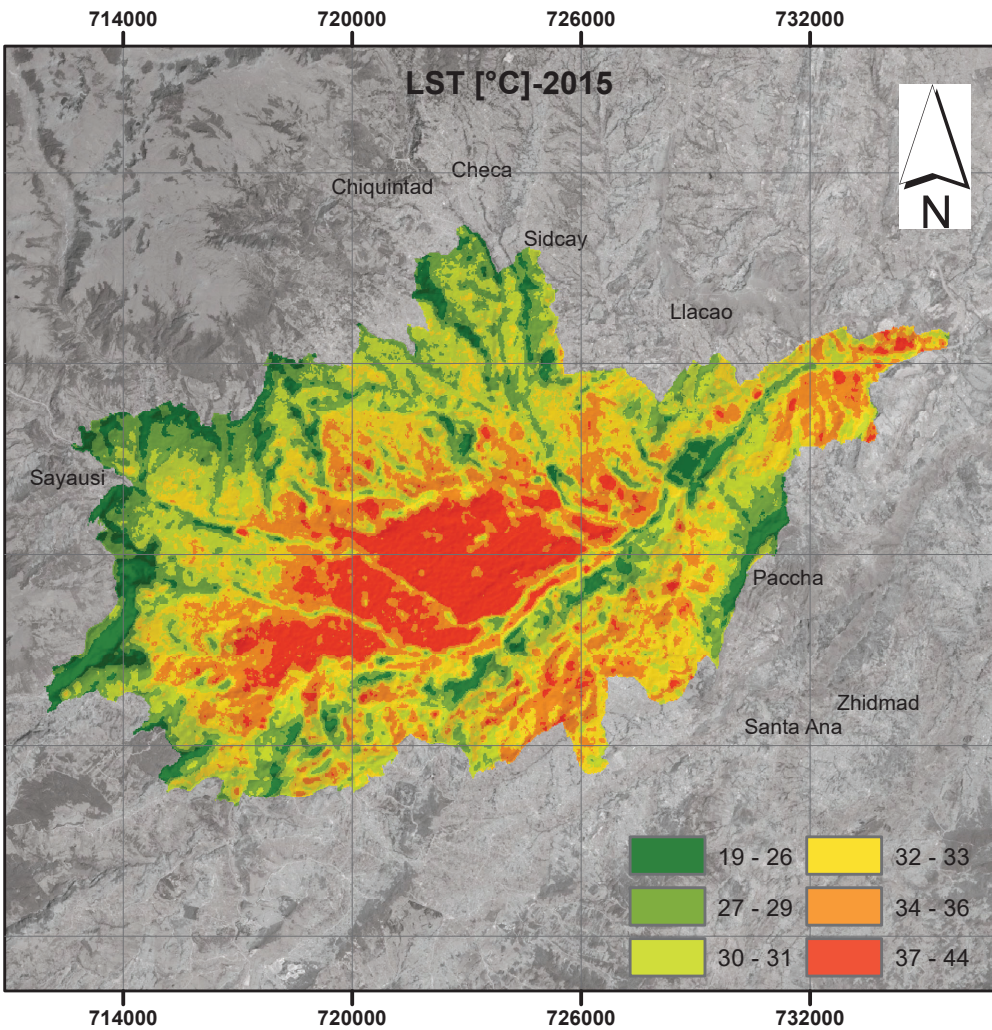
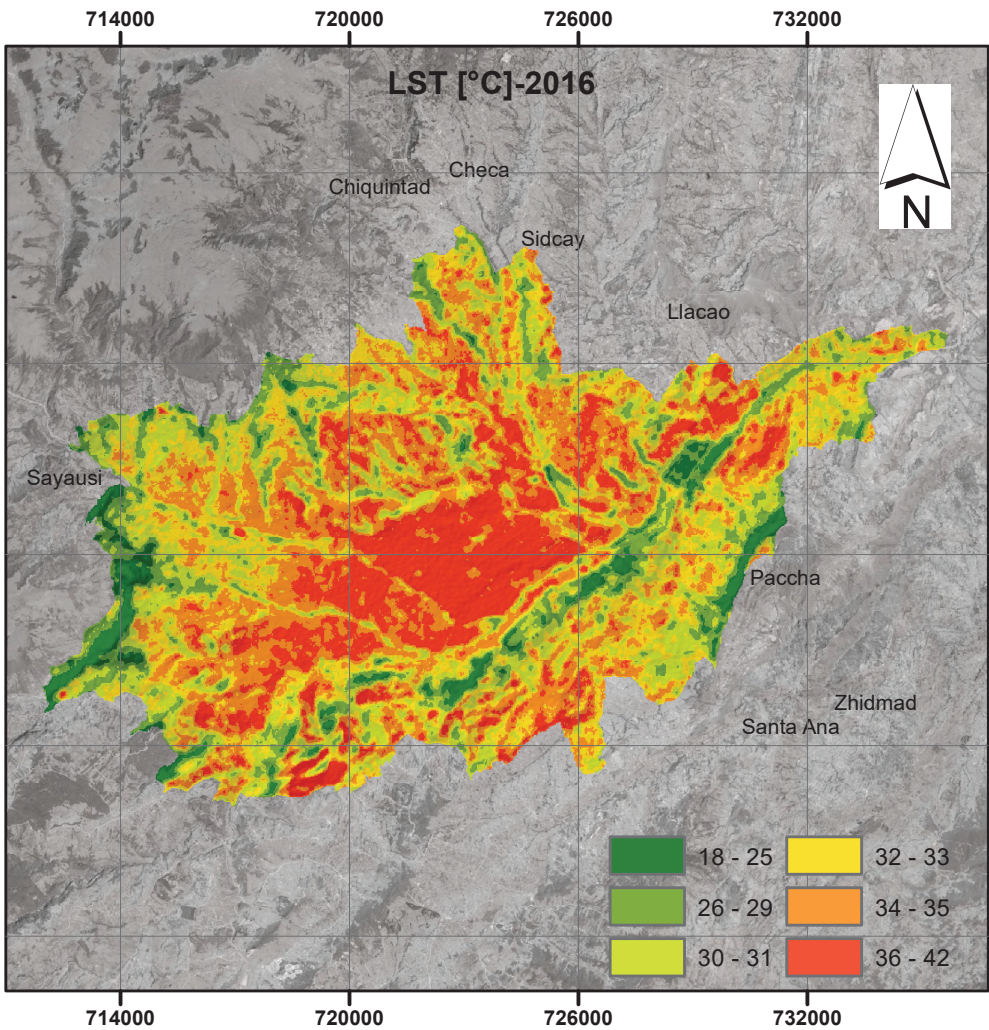
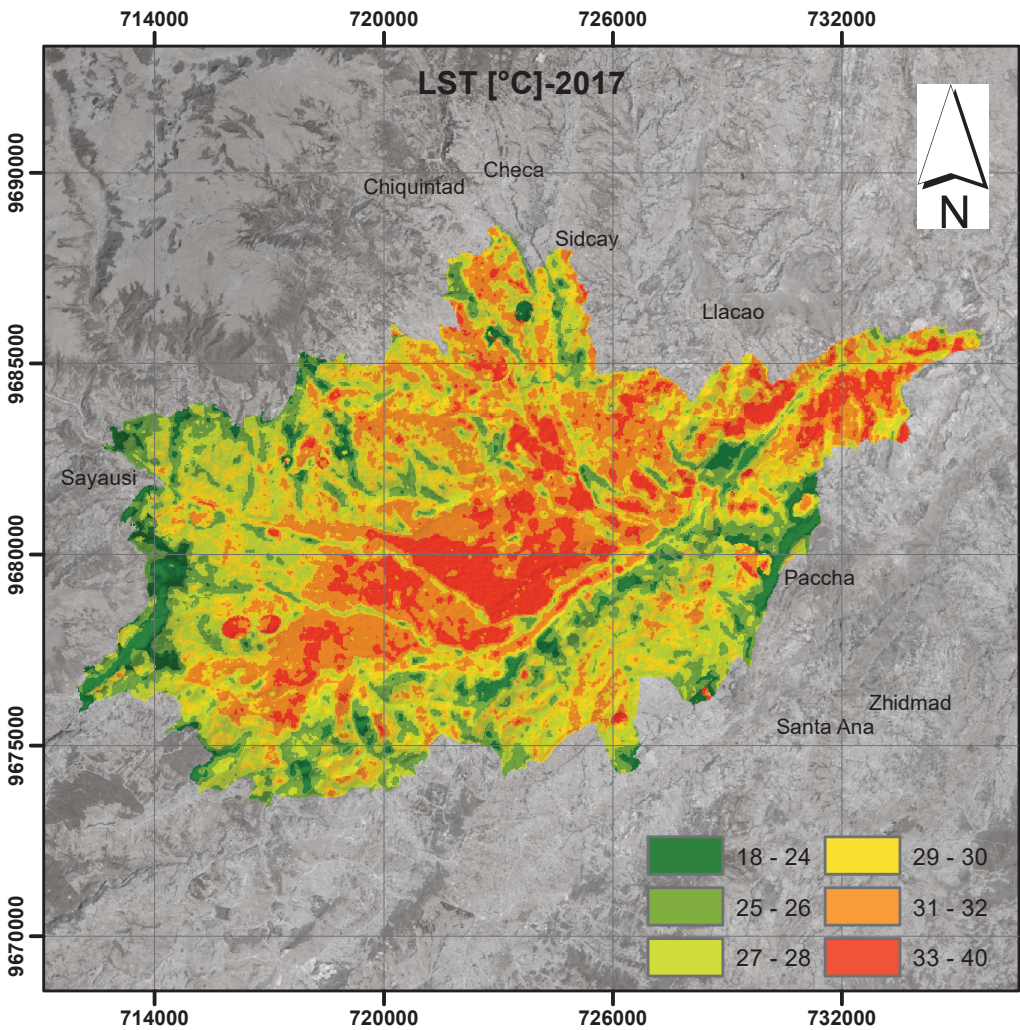
<b>CARACTERIZACIÓN DE LA ISLA DE CALOR EN LA CIUDAD DE CUENCA</b>	
NOMBRE DEL MAPA:	
<b>ÁREA DE ESTUDIO</b>	
UBICACIÓN:	PROVINCIA: <b>AZUAY</b>
	CANTÓN: <b>CUENCA</b>
	SECTOR: <b>CIUDAD DE CUENCA</b>
<b>FIRMAS DE RESPONSABILIDAD</b>	
ELABORADO:	<b>HERMEL DANIEL ÁLVAREZ PUCHA</b>
REVISADO:	<b>BIOL. DANILO MEJÍA CORONEL</b>
<b>CUENCA, ENERO 2020</b>	



## Apéndice 1.2:

# Variables de estudio

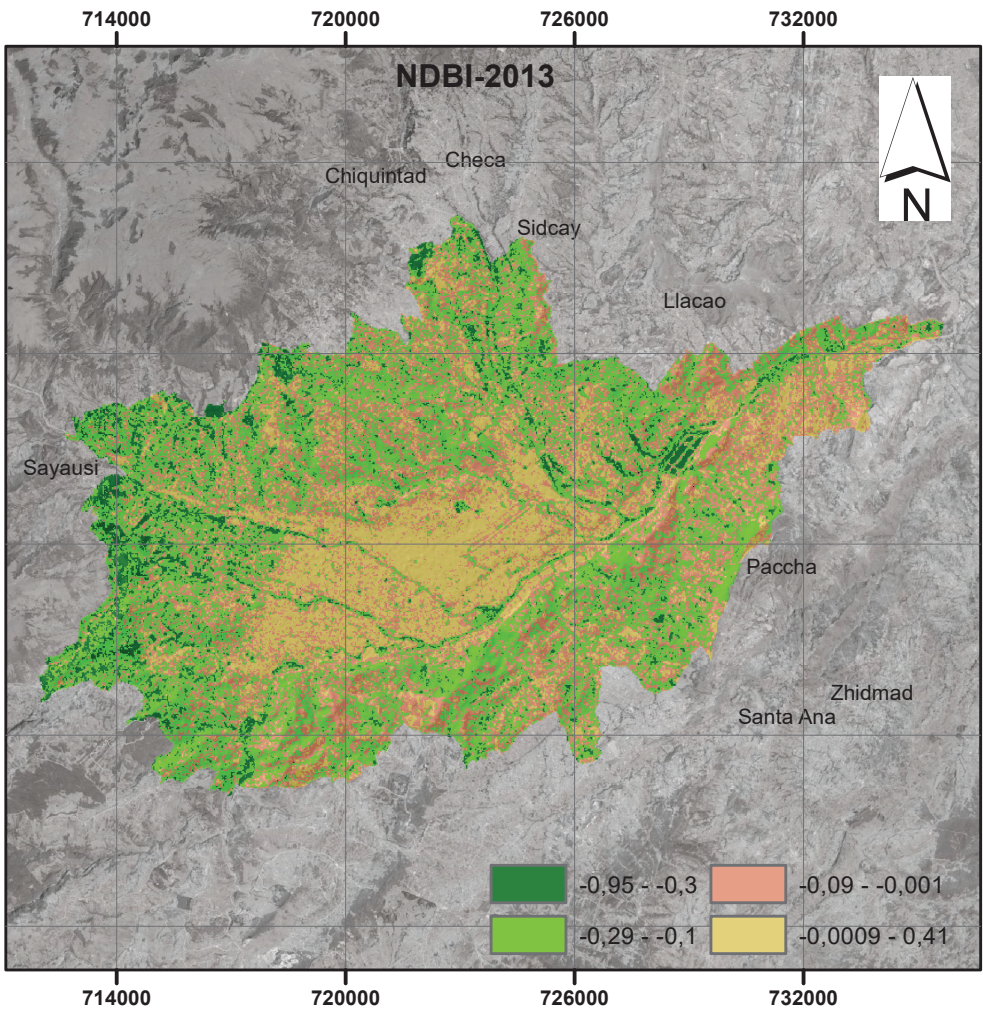
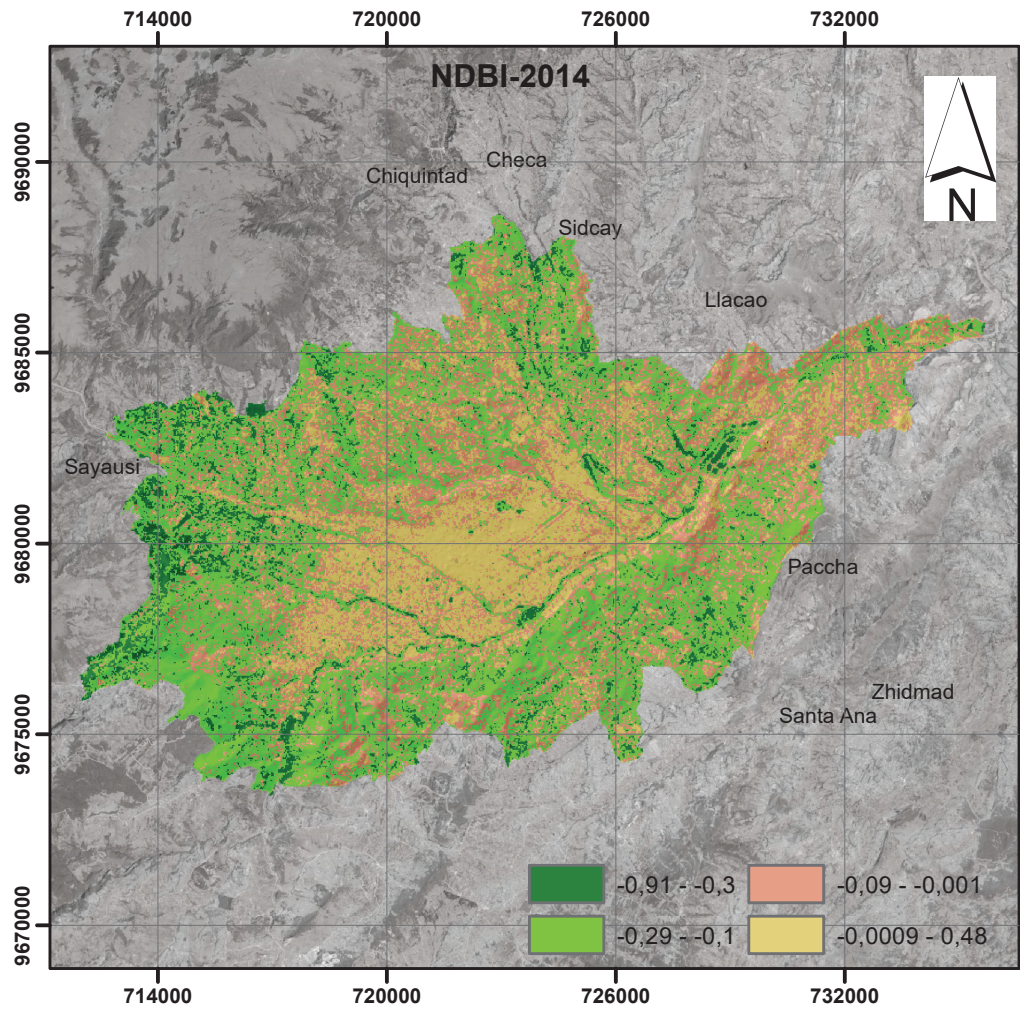
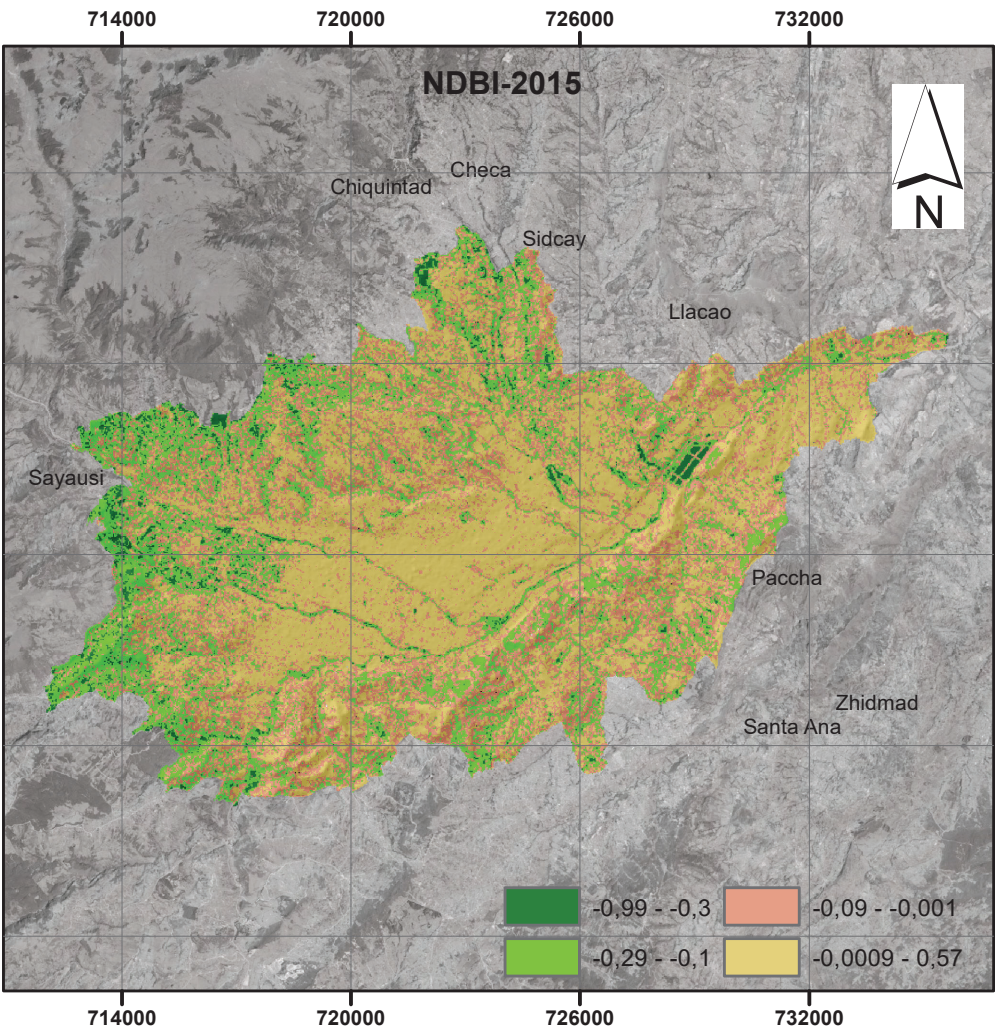
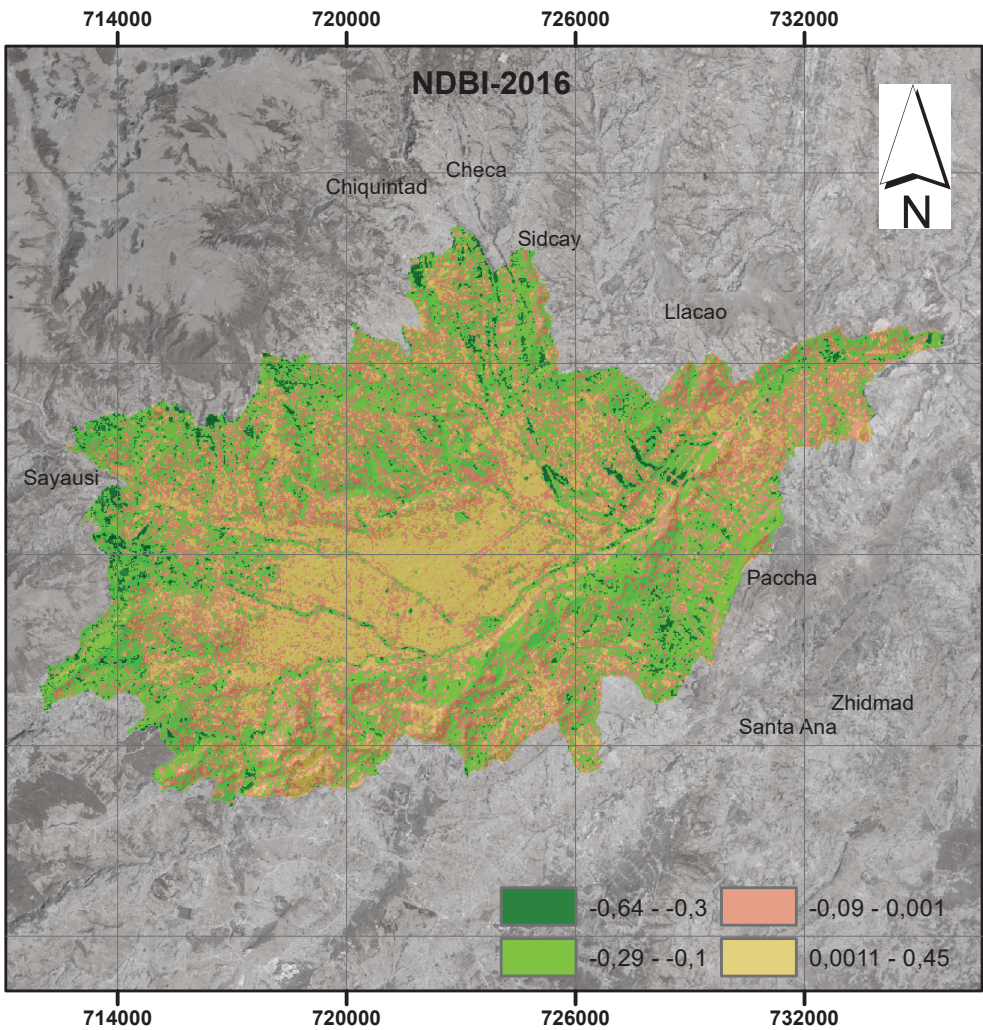
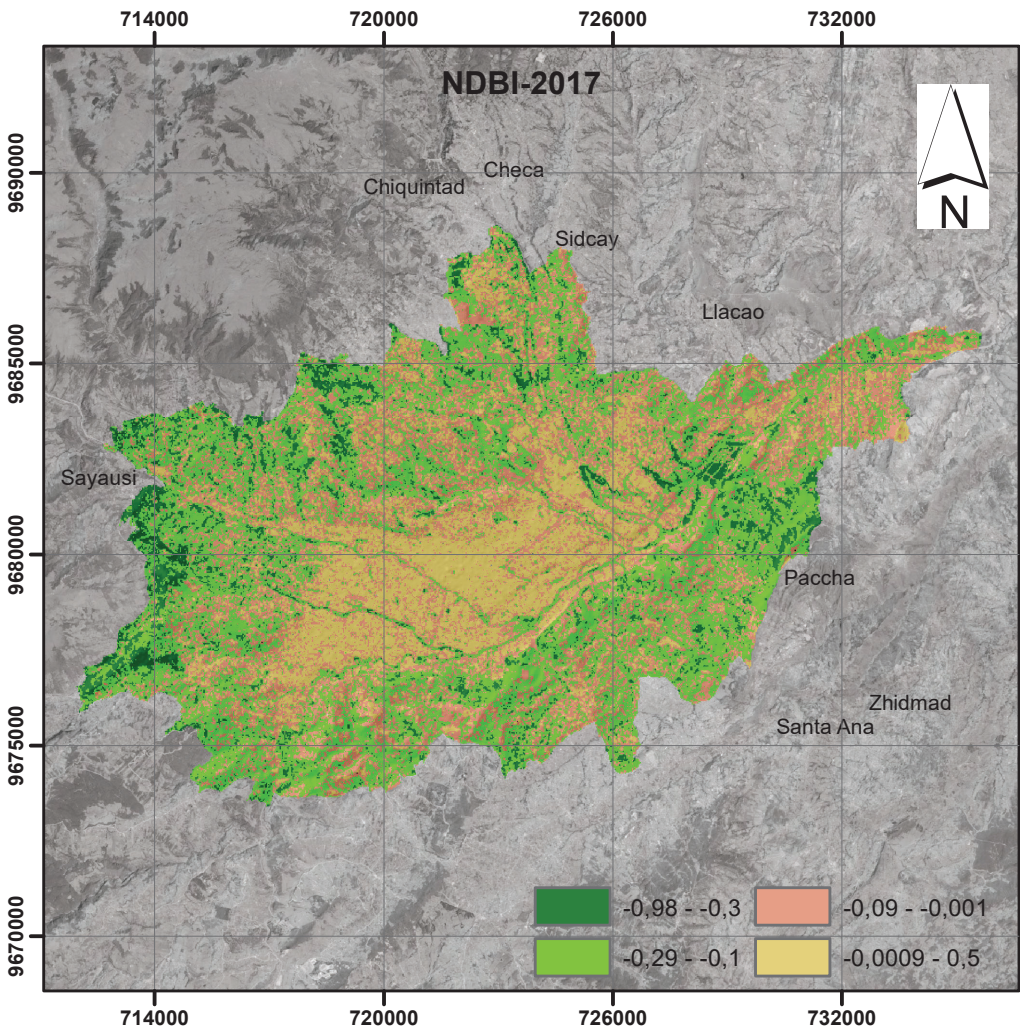




**CARACTERIZACIÓN DE LA ISLA DE CALOR SUPERFICIAL EN LA CIUDAD DE CUENCA**

NOMBRE DEL MAPA: <b>LST 2013-2017</b>	
UBICACIÓN:	PROVINCIA: <b>AZUAY</b>
	CANTÓN: <b>CUENCA</b>
	SECTOR: <b>CIUDAD DE CUENCA</b>
<b>FIRMAS DE RESPONSABILIDAD</b>	
ELABORADO:	<b>HERMEL DANIEL ÁLVAREZ PUCHA</b>
REVISADO:	<b>BIOL. DANILO MEJÍA CORONEL</b>
<b>CUENCA, ENERO 2020</b>	
<p>Kilometers 0 5 10 20</p> <p><b>DATUM:</b> WGS_1984 UTM_Zone_17S</p> <p><b>ESCALA DE INFORMACIÓN</b> 1 : 50.000</p> <p>1 centimeter = 1,98 kilometers</p>	

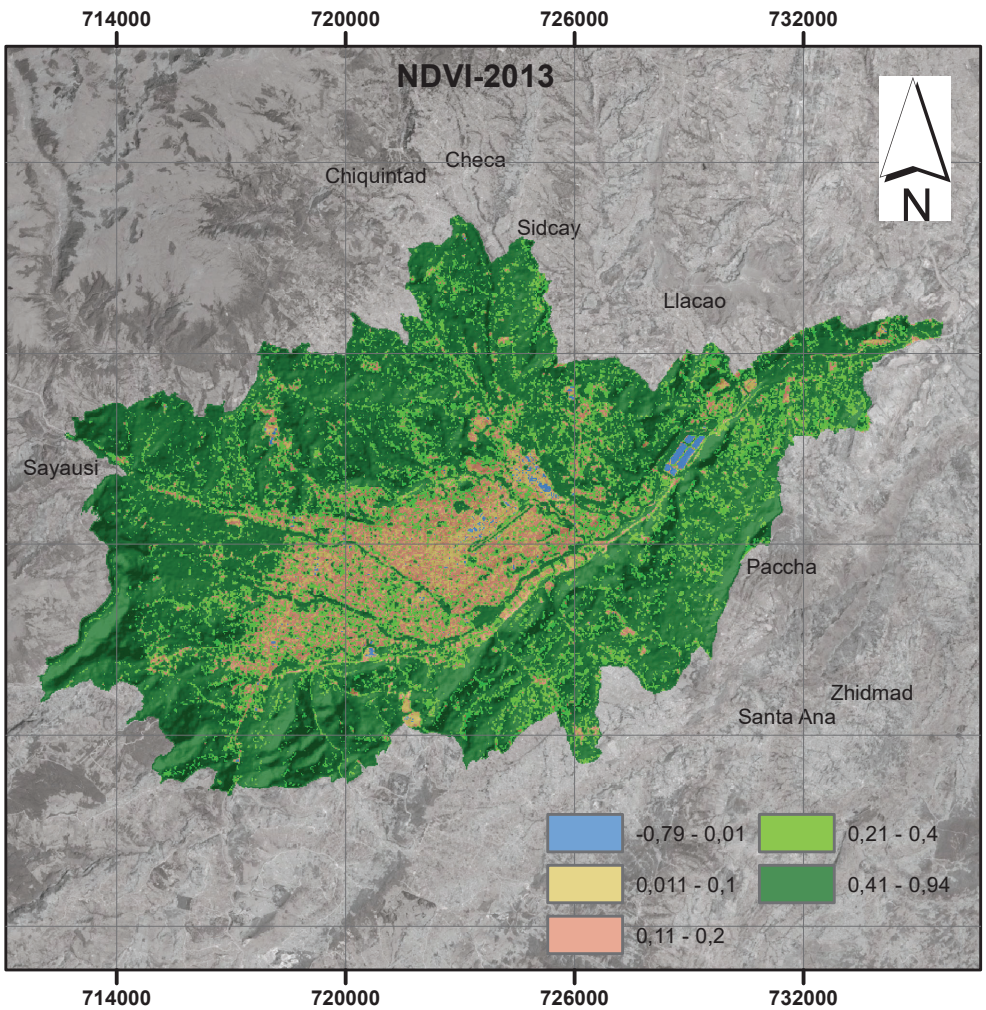
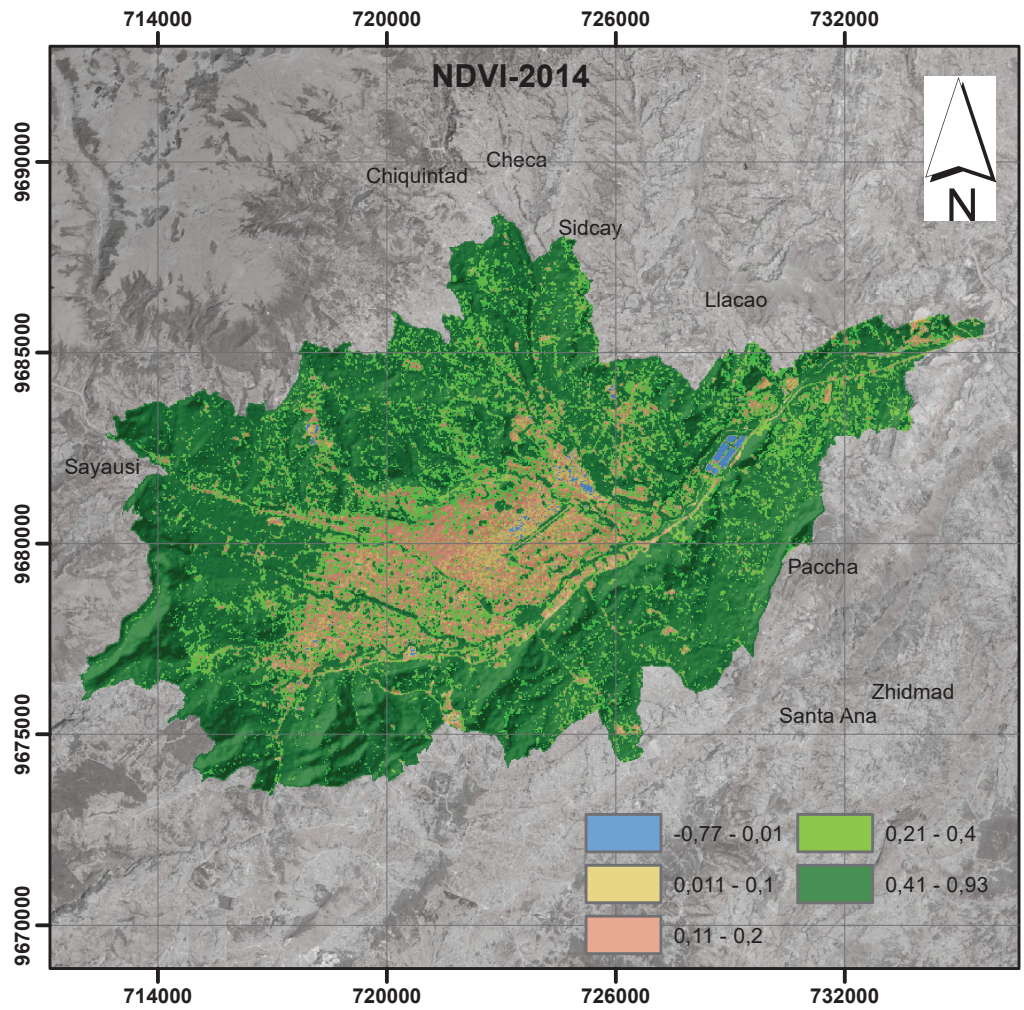
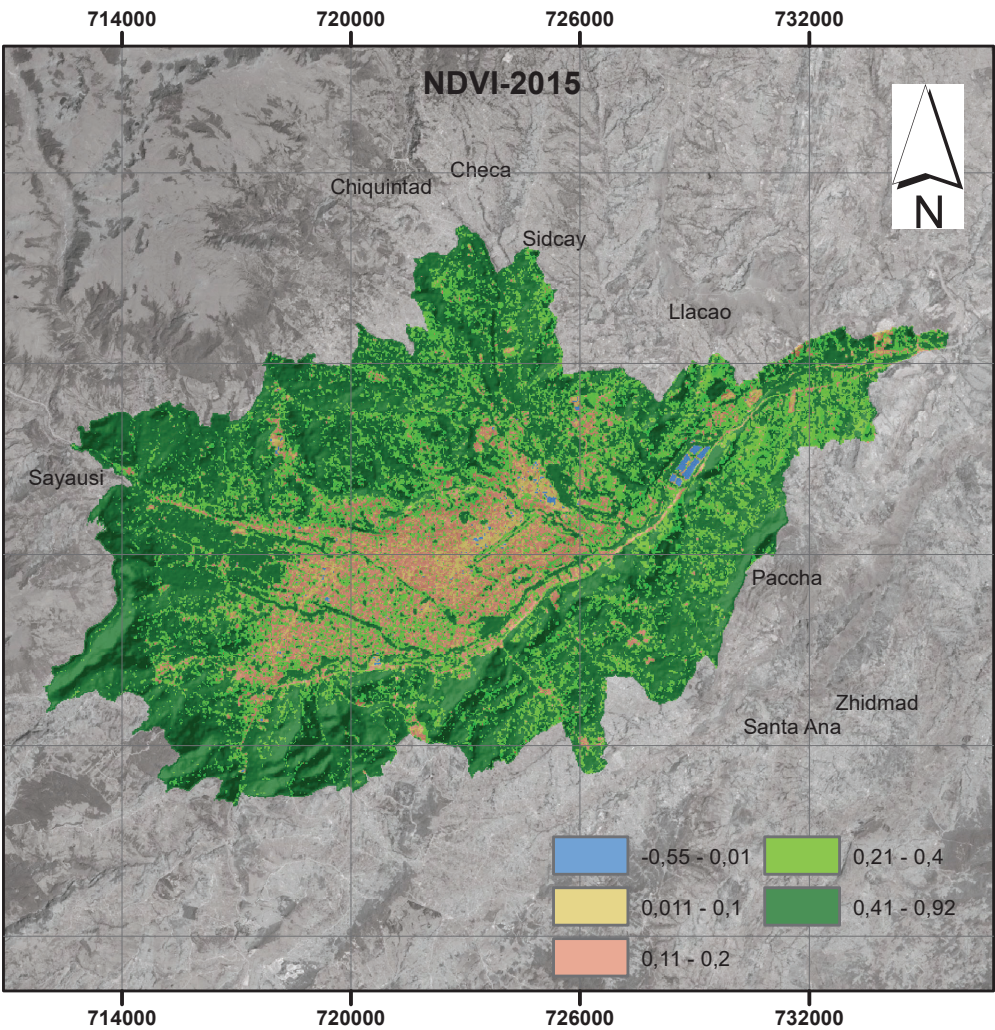
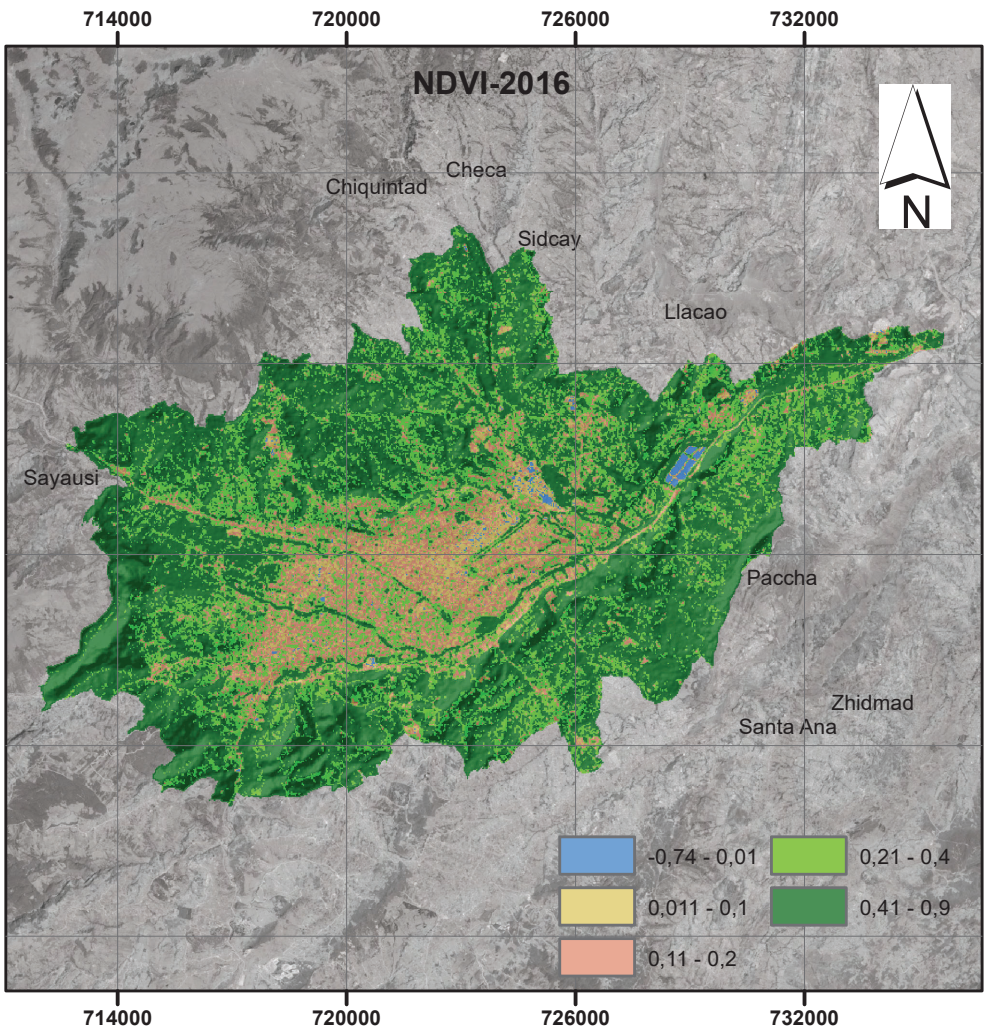
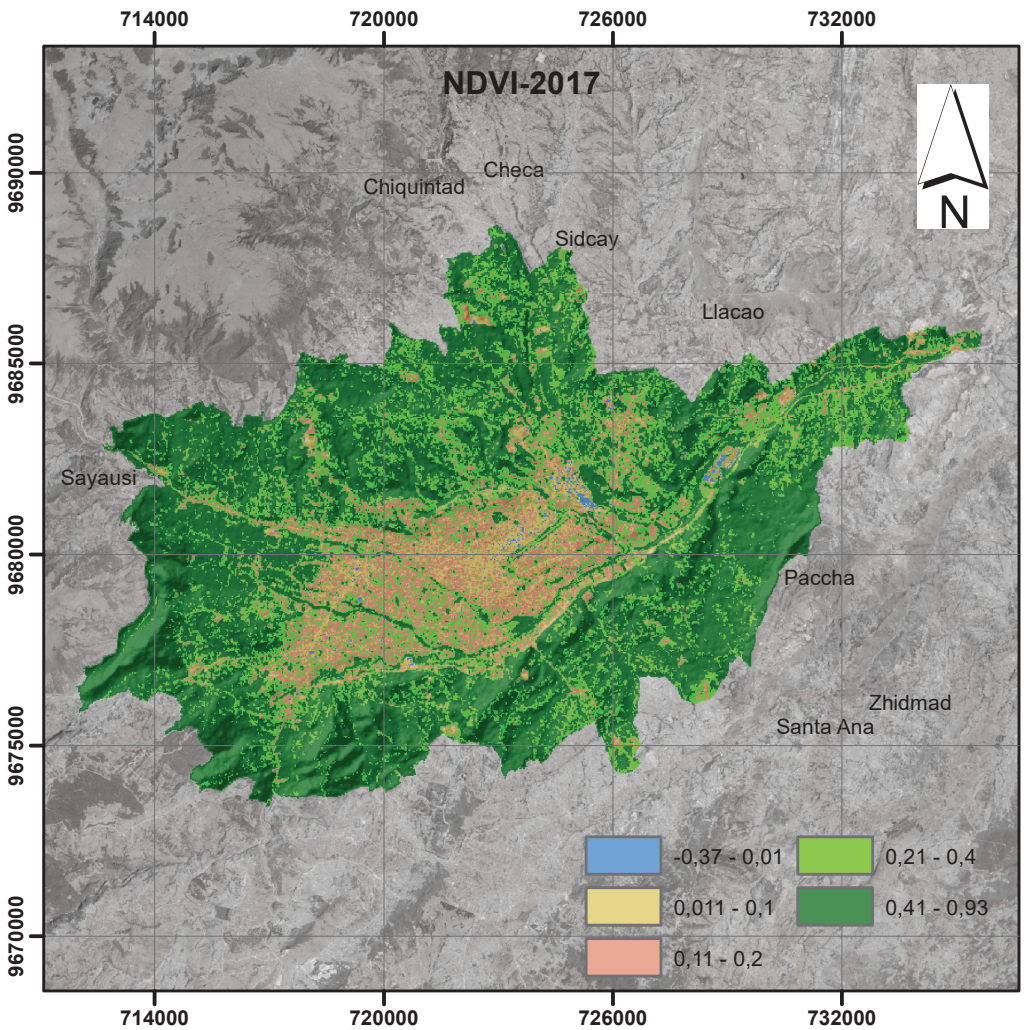




**CARACTERIZACIÓN DE LA ISLA DE CALOR SUPERFICIAL EN LA CIUDAD DE CUENCA**

NOMBRE DEL MAPA: <b>NDBI 2013-2017</b>	
UBICACIÓN:	PROVINCIA: <b>AZUAY</b>
	CANTÓN: <b>CUENCA</b>
	SECTOR: <b>CIUDAD DE CUENCA</b>
<b>FIRMAS DE RESPONSABILIDAD</b>	
ELABORADO:	<b>HERMEL DANIEL ÁLVAREZ PUCHA</b>
REVISADO:	<b>BIOL. DANILO MEJÍA CORONEL</b>
<b>CUENCA, ENERO 2020</b>	
<p>Kilometers</p> <p>0 5 10 20</p> <p><b>DATUM:</b> WGS_1984 UTM_Zone_17S</p> <p><b>ESCALA DE INFORMACIÓN</b> <b>1 : 50.000</b></p> <p>1 centimeter = 1,98 kilometers</p>	

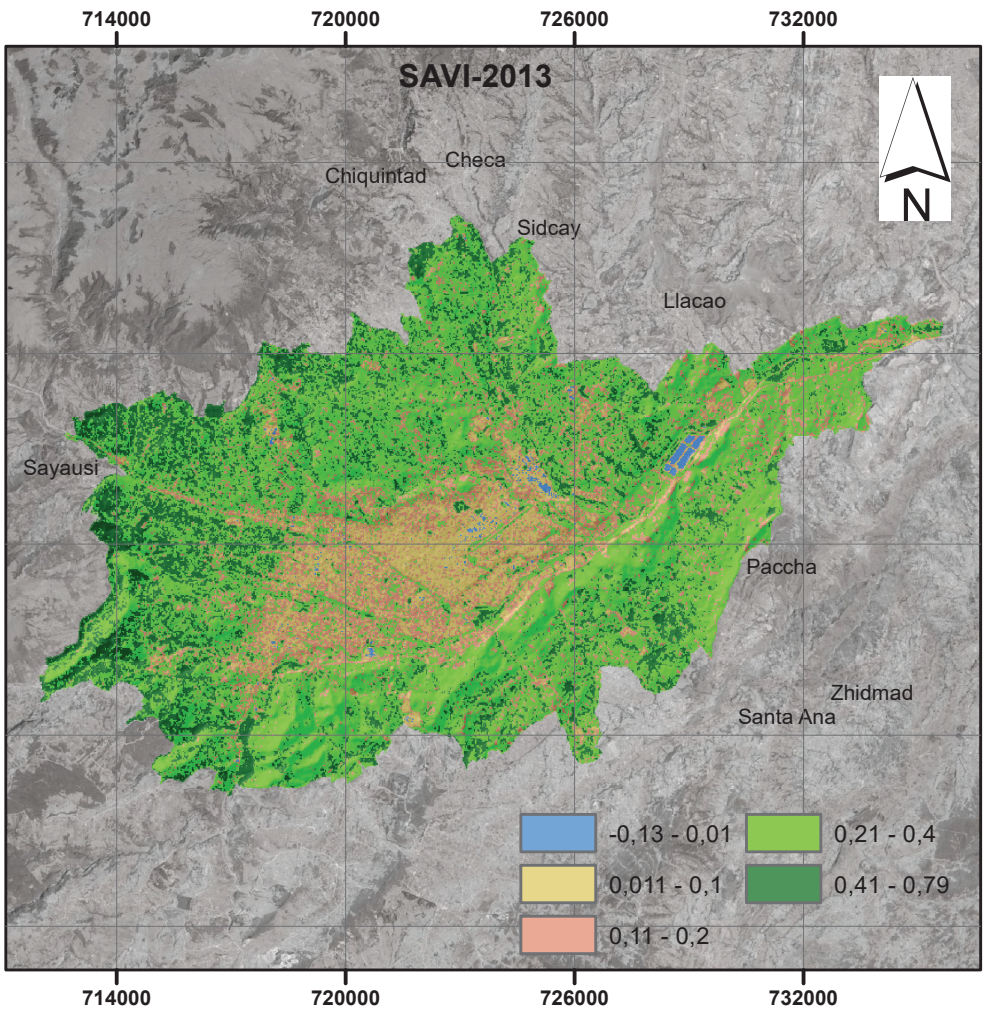
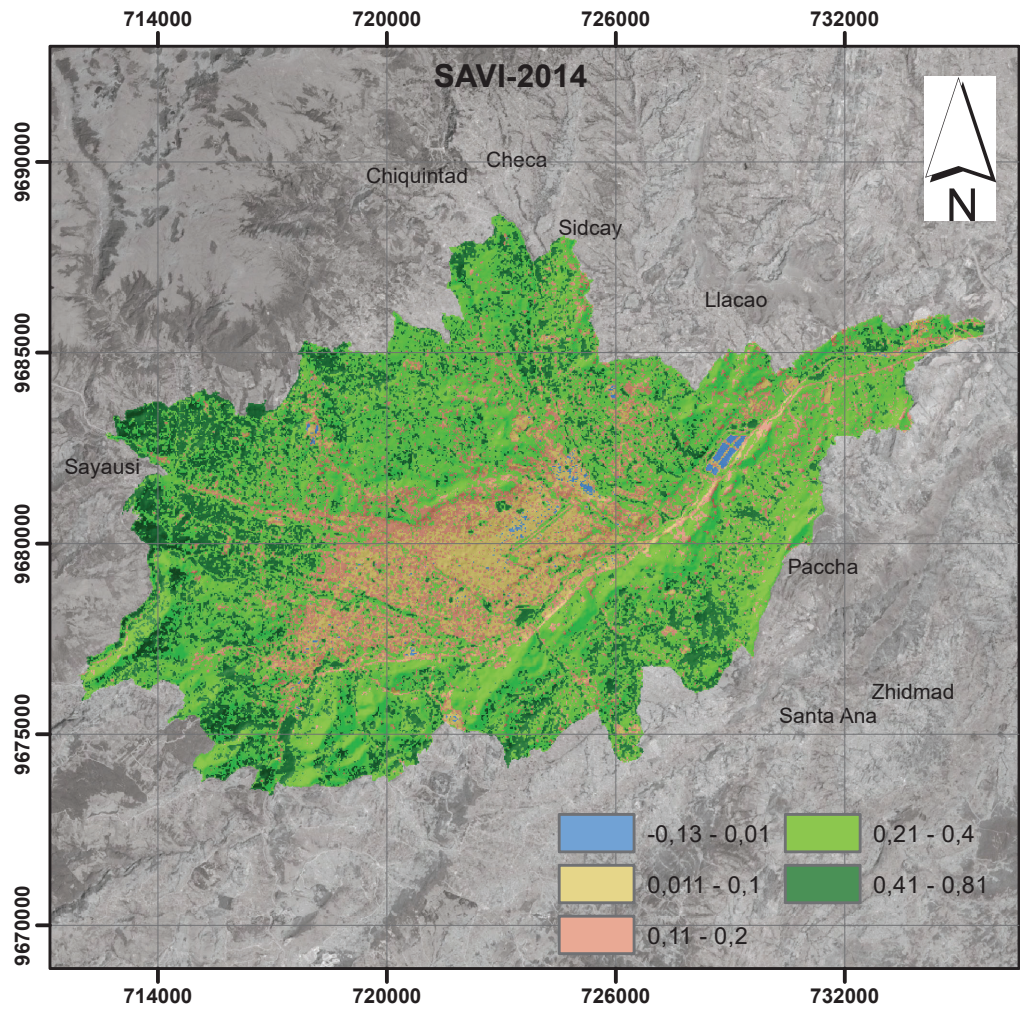
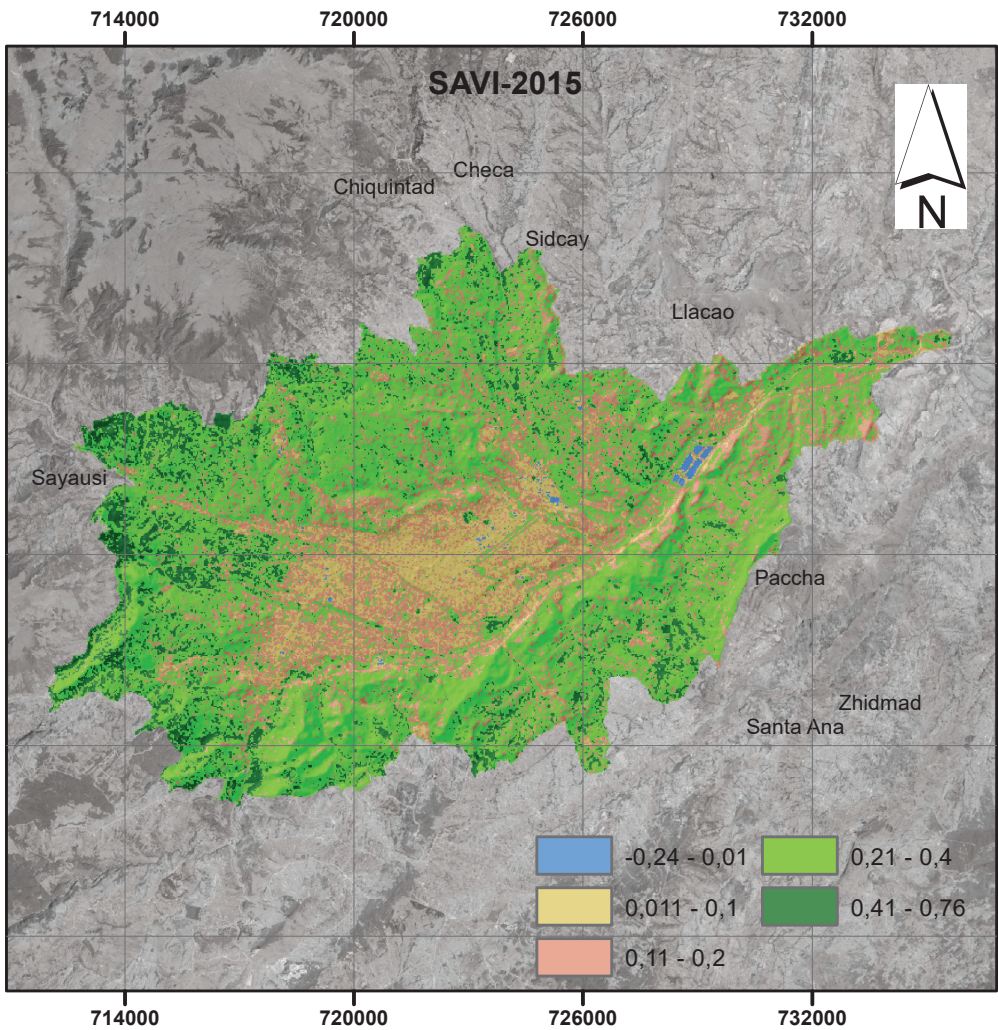
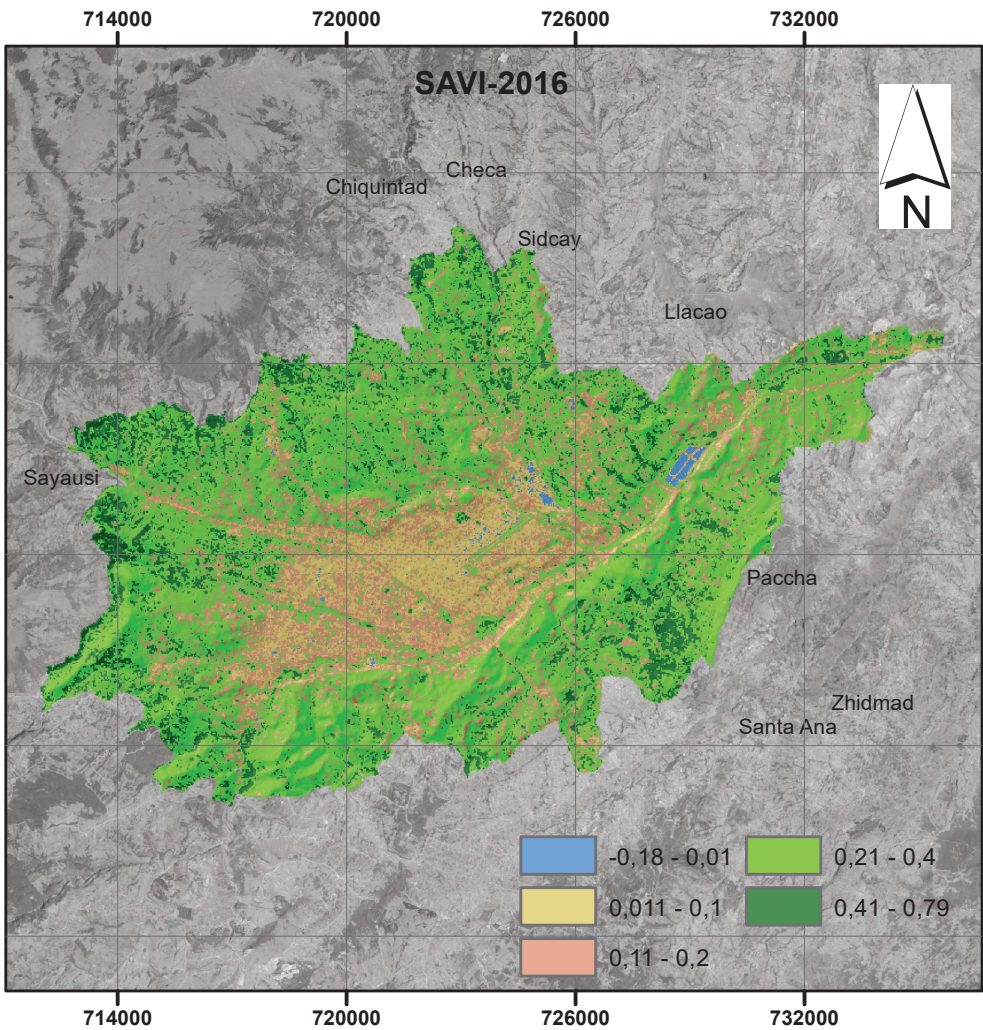
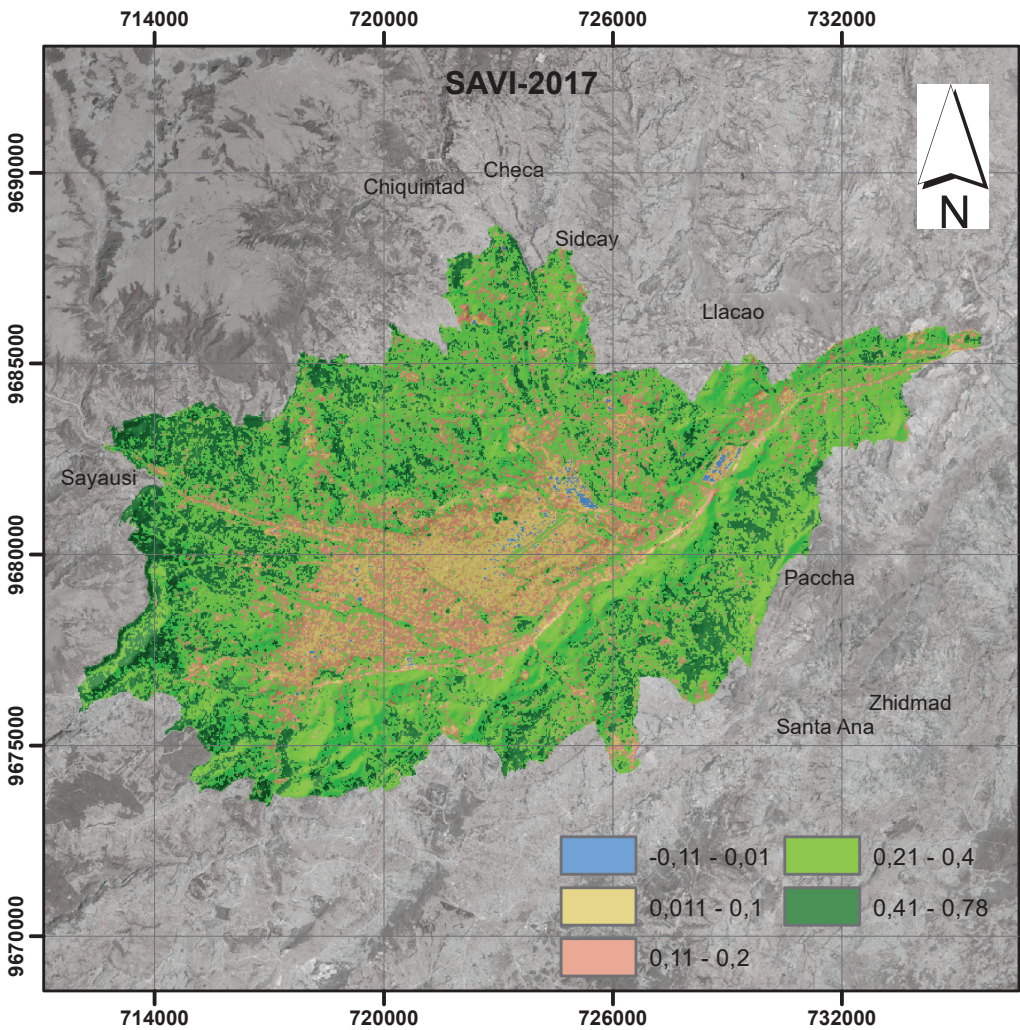




**CARACTERIZACIÓN DE LA ISLA DE CALOR SUPERFICIAL EN LA CIUDAD DE CUENCA**

NOMBRE DEL MAPA: <b>NDVI 2013-2017</b>	
UBICACIÓN:	PROVINCIA: <b>AZUAY</b>
	CANTÓN: <b>CUENCA</b>
	SECTOR: <b>CIUDAD DE CUENCA</b>
<b>FIRMAS DE RESPONSABILIDAD</b>	
ELABORADO:	<b>HERMEL DANIEL ÁLVAREZ PUCHA</b>
REVISADO:	<b>BIOL. DANILO MEJÍA CORONEL</b>
<b>CUENCA, ENERO 2020</b>	
<p>Kilometers 0 5 10 20</p> <p>DATUM: WGS_1984 UTM_Zone_17S</p> <p>ESCALA DE INFORMACIÓN 1 : 50.000</p> <p>1 centimeter = 1,98 kilometers</p>	





**CARACTERIZACIÓN DE LA ISLA DE CALOR SUPERFICIAL EN LA CIUDAD DE CUENCA**

NOMBRE DEL MAPA: **SAVI 2013-2017**

UBICACIÓN: PROVINCIA: **AZUAY**  
CANTÓN: **CUENCA**  
SECTOR: **CIUDAD DE CUENCA**

**FIRMAS DE RESPONSABILIDAD**

ELABORADO: **HERMEL DANIEL ÁLVAREZ PUCHA**

REVISADO: **BIOL. DANILO MEJÍA CORONEL**

**CUENCA, ENERO 2020**

Kilometers  
0 5 10 20

DATUM: WGS\_1984  
UTM\_Zone\_17S

ESCALA DE INFORMACIÓN  
1 : 50.000

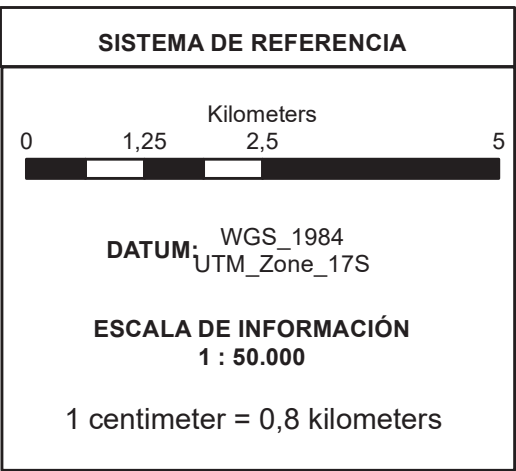
1 centimeter = 1,98 kilometers



## Apéndice 1.3:

# Corte longitudinal





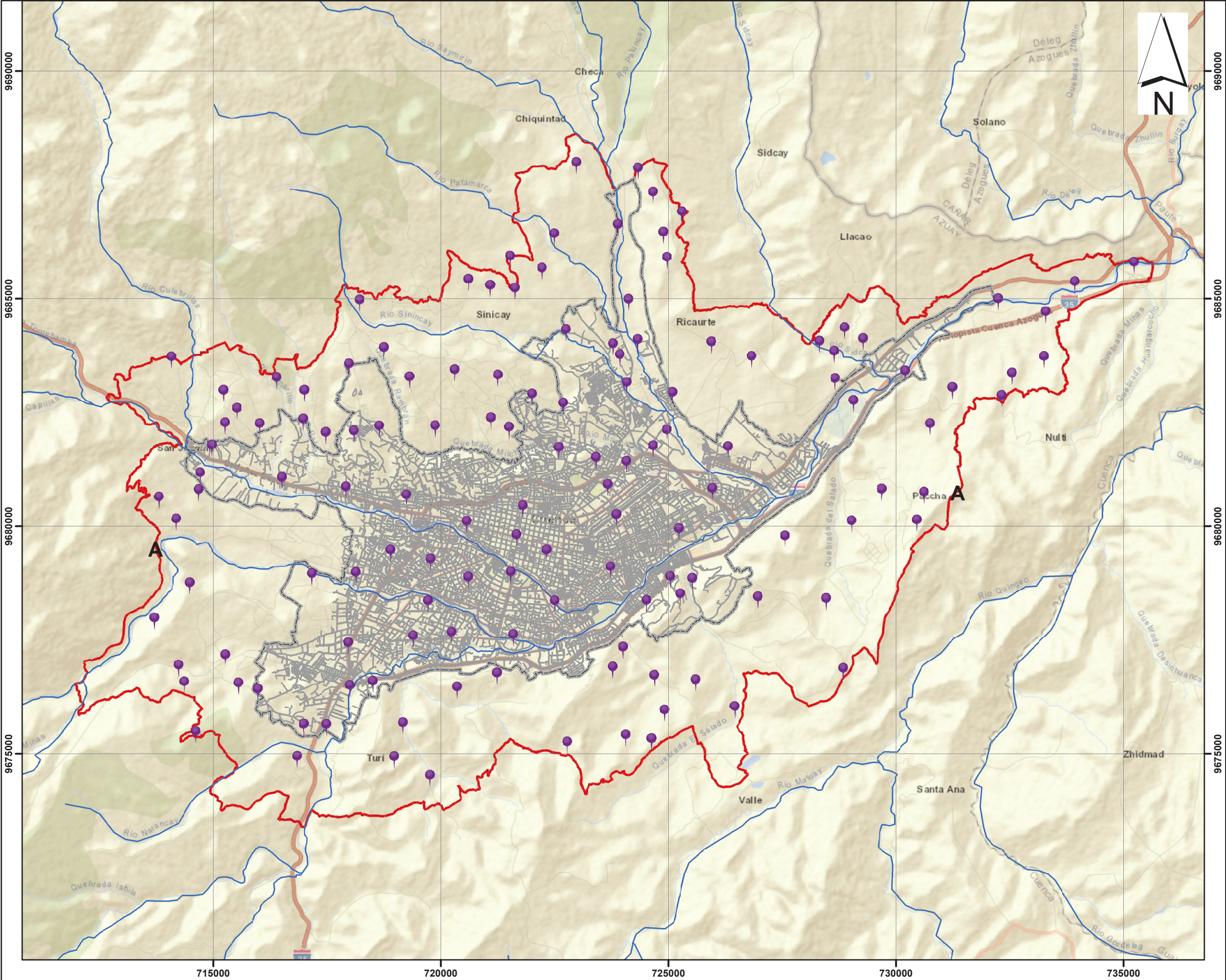


## Apéndice 1.4:

# Puntos de Muestreo



PUNTOS DE MUESTRAS ALEATORIAS  
EN LA CIUDAD DE CUENCA Y SU ZONA DE EXPANSIÓN



**LEYENDA**

- Puntos\_muestras
- Red hidrológica
- Límite urbano
- Límite de expansión
- Planos de Cuenca

CARACTERIZACIÓN DE LA ISLA DE CALOR EN LA CIUDAD DE CUENCA		
NOMBRE DEL MAPA:		PUNTOS DE MUESTREO
UBICACIÓN:	PROVINCIA:	AZUAY
	CANTÓN:	CUENCA
	SECTOR:	CIUDAD DE CUENCA
FIRMAS DE RESPONSABILIDAD		
ELABORADO:	HERMEL DANIEL ÁLVAREZ PUCHA	
REVISADO:	BIOL. DANILO MEJÍA CORONEL	
CUENCA, ENERO 2020		

**SISTEMA DE REFERENCIA**

0 1,25 2,5 5 Kilometers

**DATUM:** WGS\_1984  
UTM\_Zone\_17S

**ESCALA DE INFORMACIÓN**  
1 : 50.000

1 centimeter = 0,8 kilometers

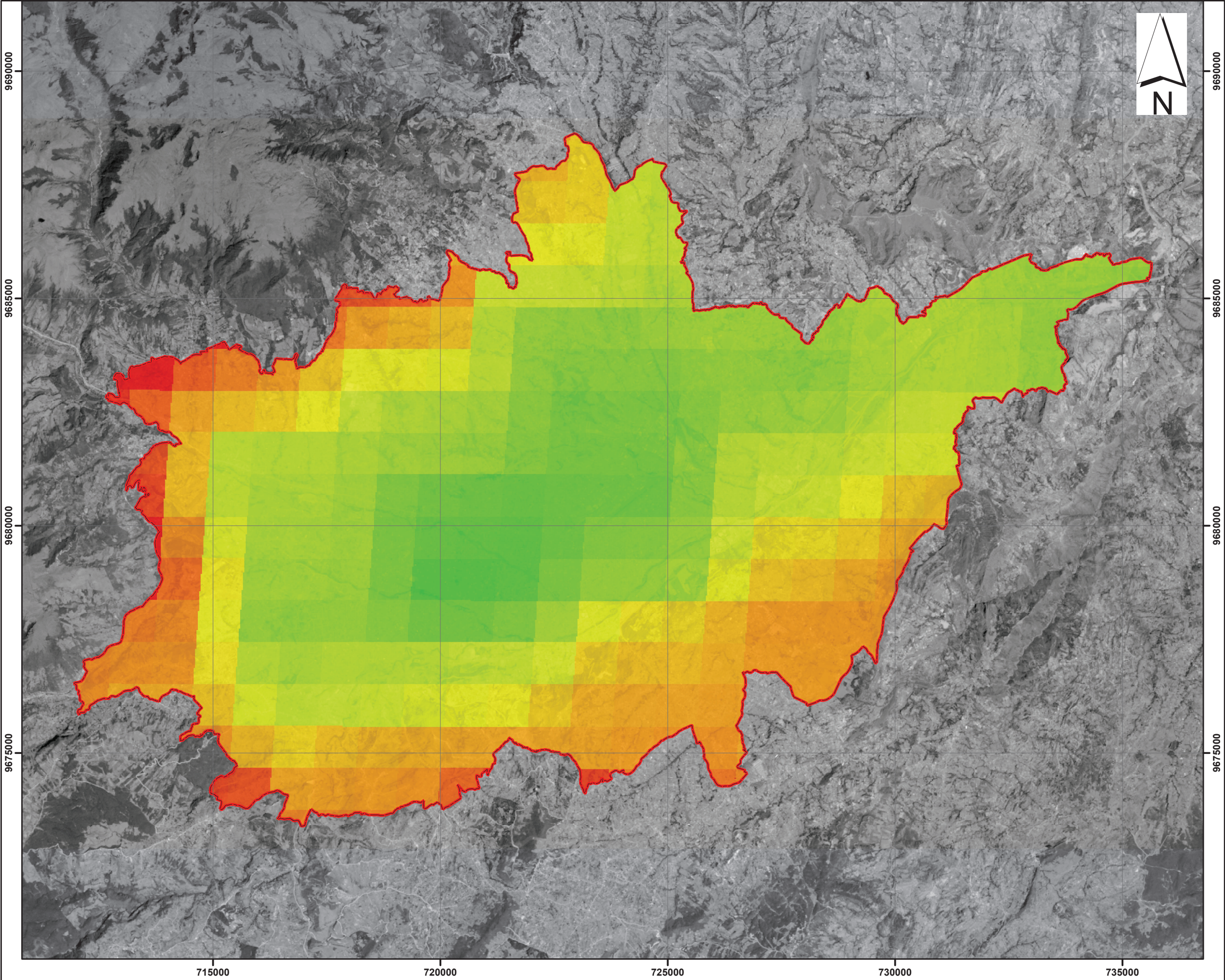


## Apéndice 1.5:

# Mapa MODIS



IMAGEN DEL INSTRUMENTO MODIS PARA  
LA CIUDAD DE CUENCA Y SU ZONA DE EXPANSIÓN



LEYENDA

MODIS

LST [°C]

High : 35,97

Low : 26,53

Límite de expansión

CARACTERIZACIÓN DE LA ISLA DE CALOR EN LA CIUDAD DE CUENCA		
NOMBRE DEL MAPA:           IMAGEN MODIS		
UBICACIÓN:	PROVINCIA:	AZUAY
	CANTÓN:	CUENCA
	SECTOR:	CIUDAD DE CUENCA
FIRMAS DE RESPONSABILIDAD		
ELABORADO:	HERMEL DANIEL ÁLVAREZ PUCHA	
REVISADO:	BIOL. DANILO MEJÍA CORONEL	
CUENCA, ENERO 2020		

SISTEMA DE REFERENCIA

Kilometers

01,252,55

DATUM: WGS\_1984  
UTM\_Zone\_17S

ESCALA DE INFORMACIÓN  
1 : 50.000

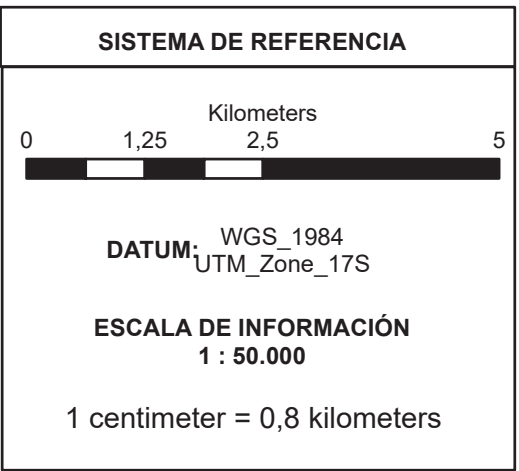
1 centimeter = 0,8 kilometers



## Apéndice 1.6:

# Puntos de validación





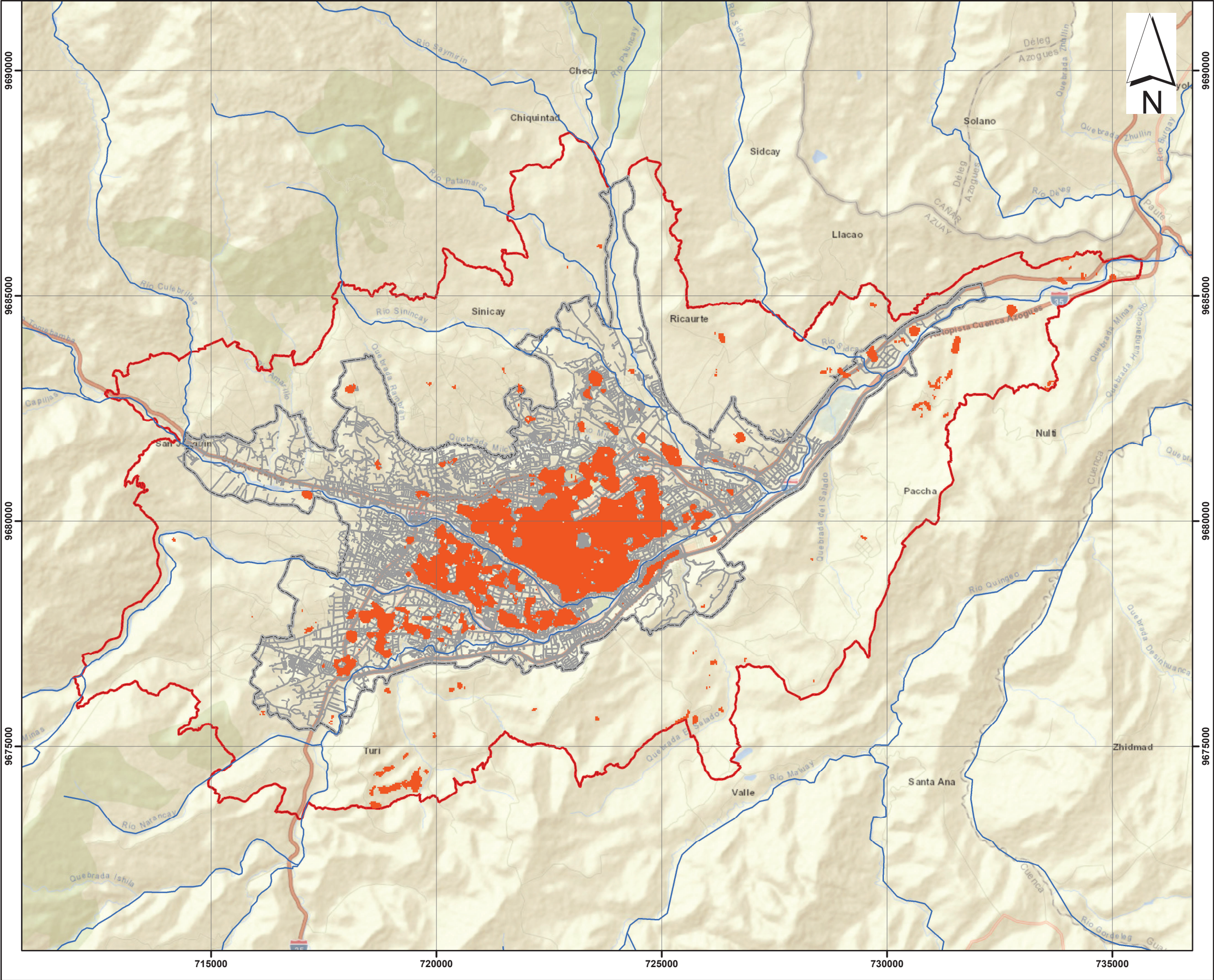


## Apéndice 1.7:

# Caracterización de UHI



CARACTERIZACIÓN DE LAS ISLAS DE CALOR  
EN LA CIUDAD DE CUENCA Y SU ZONA DE EXPANSIÓN



**LEYENDA**

- Red hidrológica
- Límite urbano
- Límite de expansión
- Planos de Cuenca
- Zonas con UHI

CARACTERIZACIÓN DE LA ISLA DE CALOR EN LA CIUDAD DE CUENCA		
NOMBRE DEL MAPA: ISLAS DE CALOR SUPERFICIAL		
UBICACIÓN:	PROVINCIA:	AZUAY
	CANTÓN:	CUENCA
	SECTOR:	CIUDAD DE CUENCA
FIRMAS DE RESPONSABILIDAD		
ELABORADO:	HERMEL DANIEL ÁLVAREZ PUCHA	
REVISADO:	BIOL. DANILO MEJÍA CORONEL	
CUENCA, ENERO 2020		

**SISTEMA DE REFERENCIA**

Kilometers  
0 1,25 2,5 5

**DATUM:** WGS\_1984  
UTM\_Zone\_17S

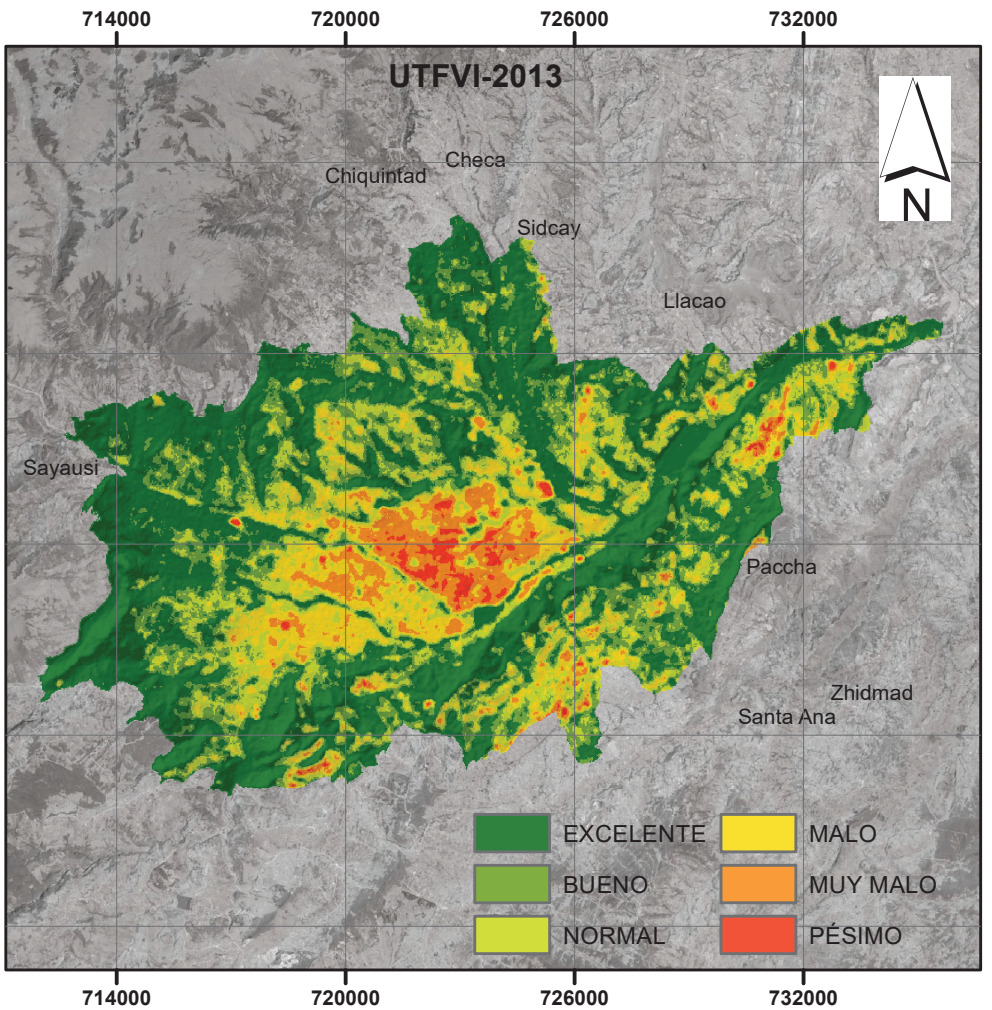
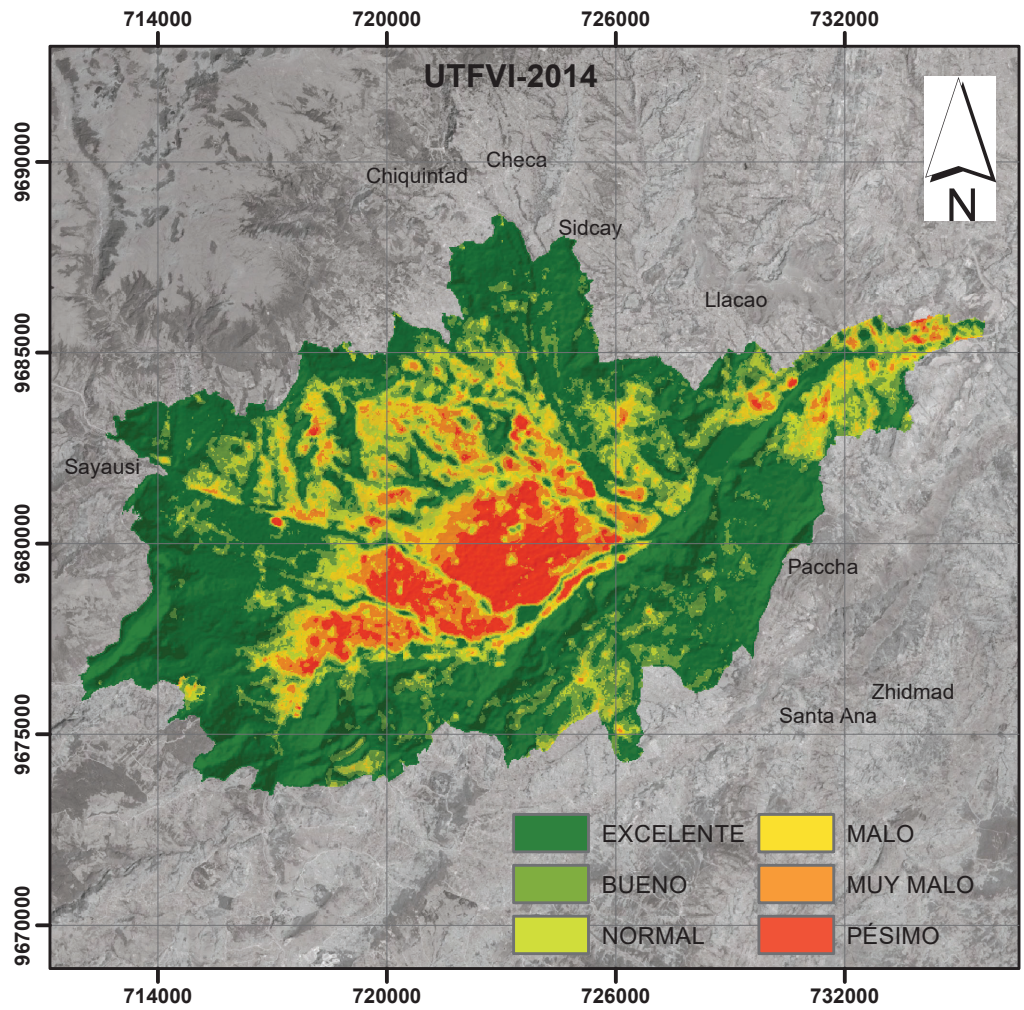
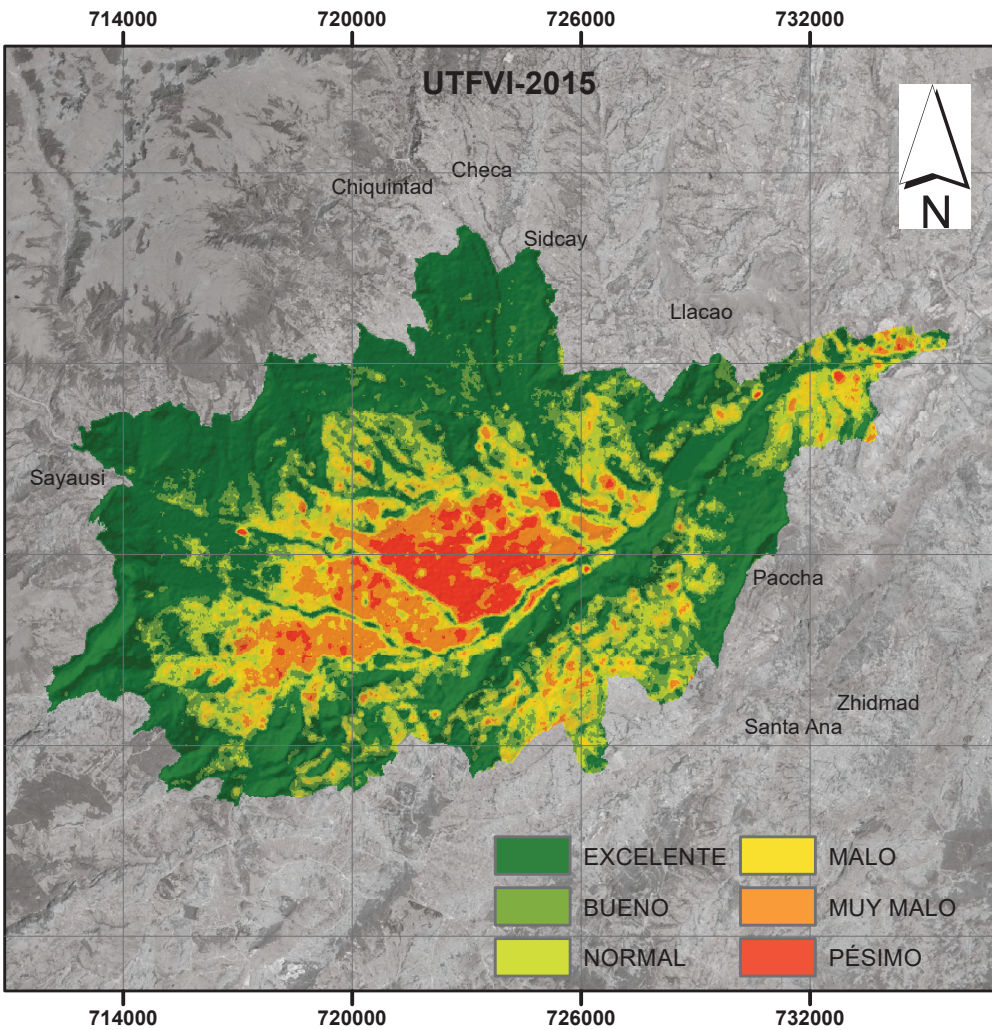
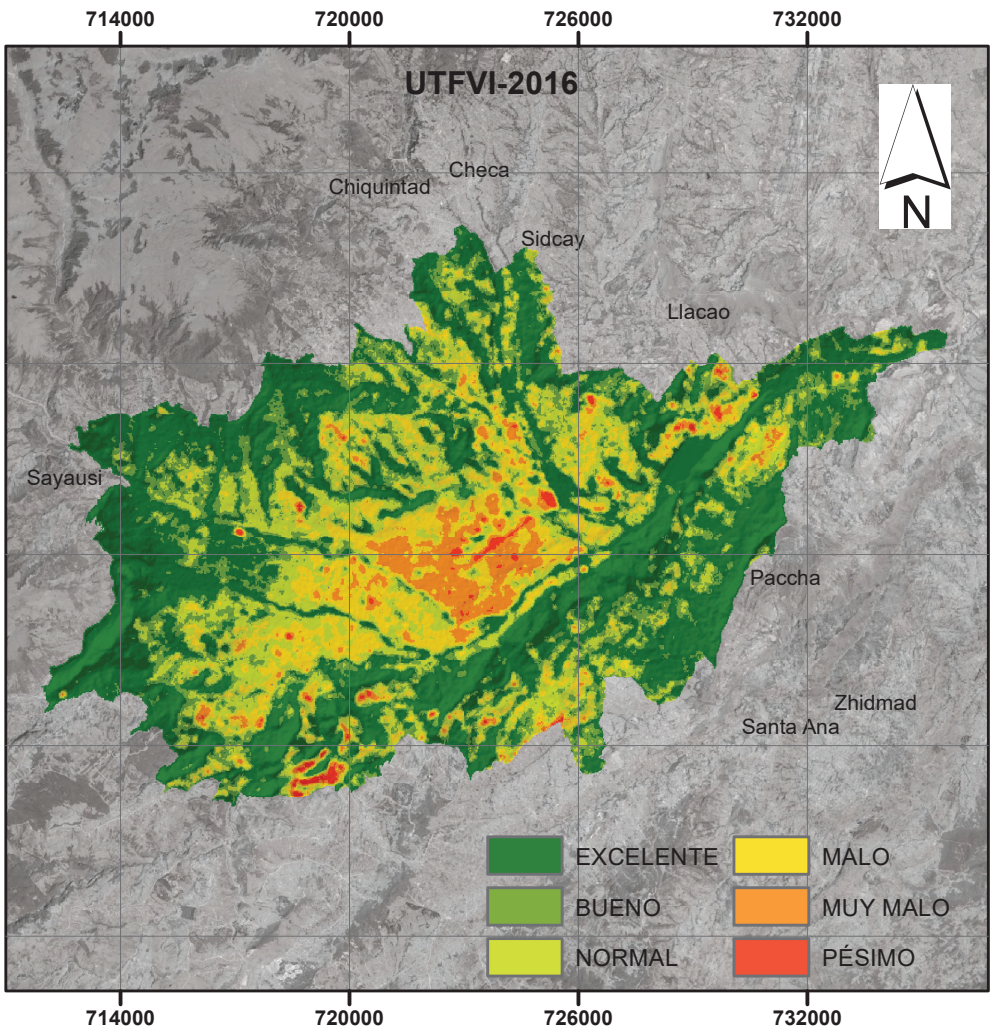
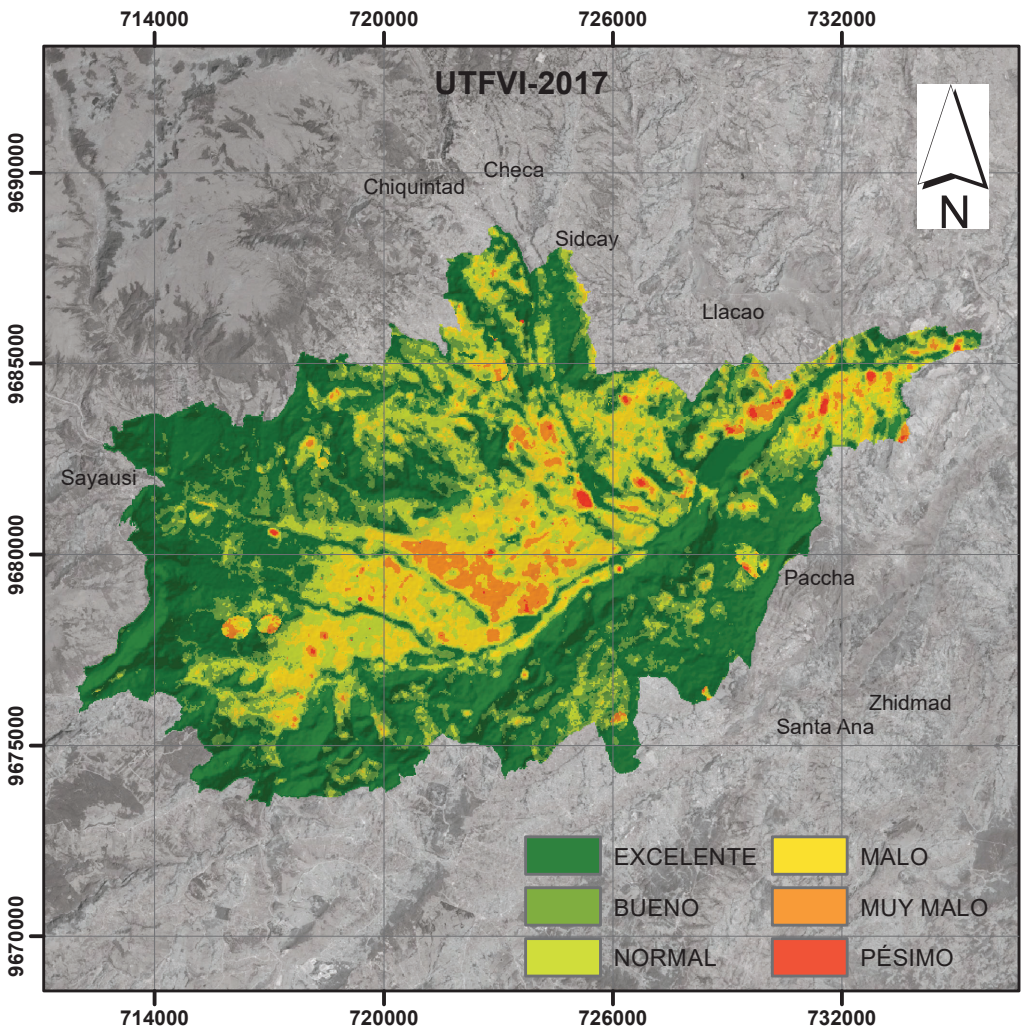
**ESCALA DE INFORMACIÓN**  
1 : 50.000

1 centimeter = 0,8 kilometers



## Apéndice 1.8: Índice UTFVI





CARACTERIZACIÓN DE LA ISLA DE CALOR SUPERFICIAL EN LA CIUDAD DE CUENCA	
NOMBRE DEL MAPA: UTFVI 2013-2017	
UBICACIÓN:	PROVINCIA: AZUAY
	CANTÓN: CUENCA
	SECTOR: CIUDAD DE CUENCA
FIRMAS DE RESPONSABILIDAD	
ELABORADO:	HERMEL DANIEL ÁLVAREZ PUCHA
REVISADO:	BIOL. DANILO MEJÍA CORONEL
CUENCA, ENERO 2020	
<div><div>051020</div><div>Kilometers</div></div> <div>DATUM: WGS_1984 UTM_Zone_17S</div> <div>ESCALA DE INFORMACIÓN 1 : 50.000</div> <div>1 centimeter = 1,98 kilometers</div> <div></div>	

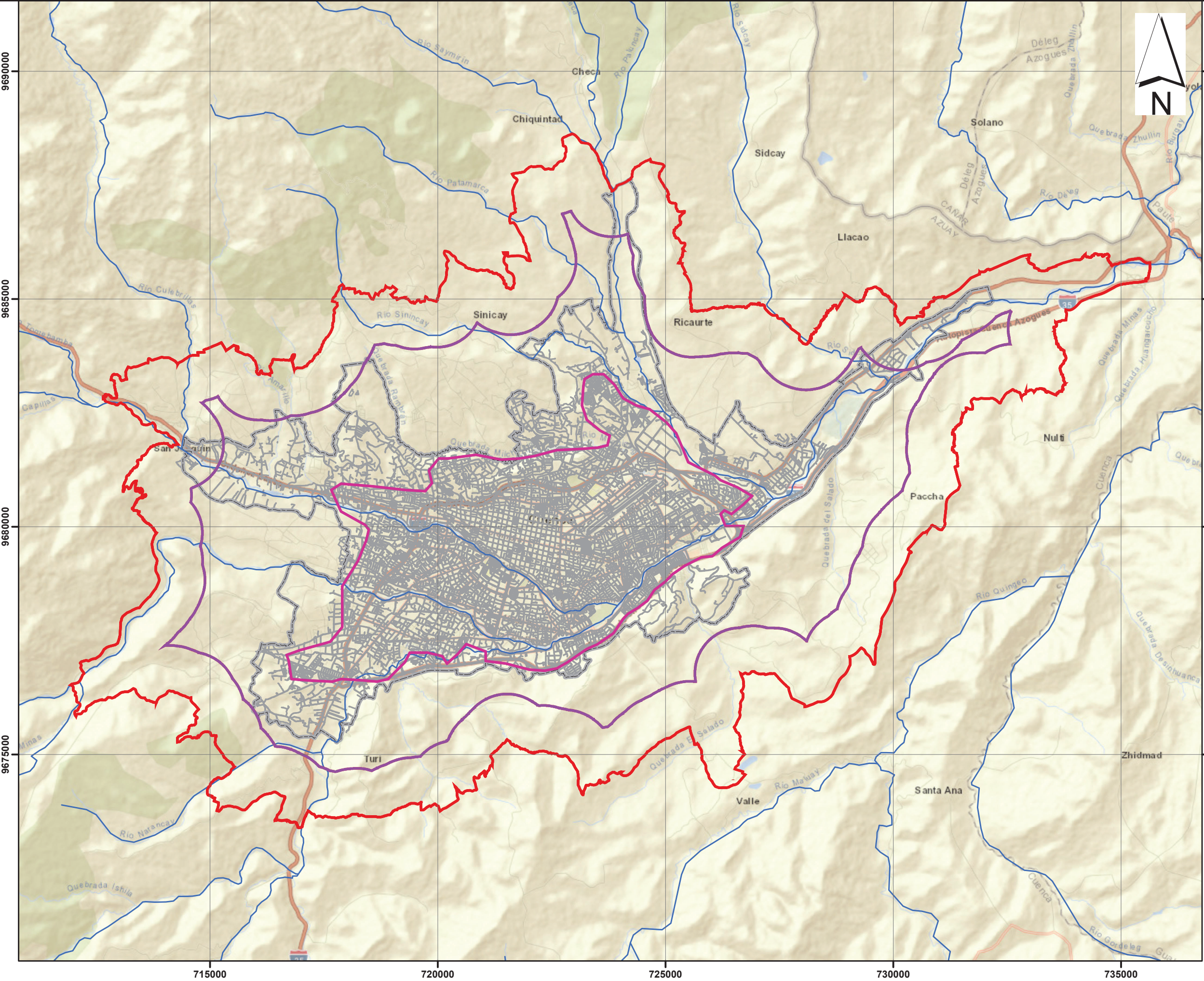


## Apéndice 1.9:

# Zonas de evaluación UHI



ZONAS DE EVALUACIÓN PARA DETERMINAR LA INTENSIDAD UHI  
EN LA CIUDAD DE CUENCA Y SU ZONA DE EXPANSIÓN



**LEYENDA**

- Red hidrológica
- Límite urbano
- Límite de expansión
- Planos de Cuenca
- Núcleo Urbano
- Zona UHI 1
- Zona UHI 2

CARACTERIZACIÓN DE LA ISLA DE CALOR EN LA CIUDAD DE CUENCA		
NOMBRE DEL MAPA: ZONAS DE EVALUACIÓN		
UBICACIÓN:	PROVINCIA:	AZUAY
	CANTÓN:	CUENCA
	SECTOR:	CIUDAD DE CUENCA
FIRMAS DE RESPONSABILIDAD		
ELABORADO:	HERMEL DANIEL ÁLVAREZ PUCHA	
REVISADO:	BIOL. DANILO MEJÍA CORONEL	
CUENCA, ENERO 2020		

**SISTEMA DE REFERENCIA**

Kilometers  
0 1,25 2,5 5

**DATUM:** WGS\_1984  
UTM\_Zone\_17S

**ESCALA DE INFORMACIÓN**  
1 : 50.000

1 centimeter = 0,8 kilometers





## Apéndice 2:

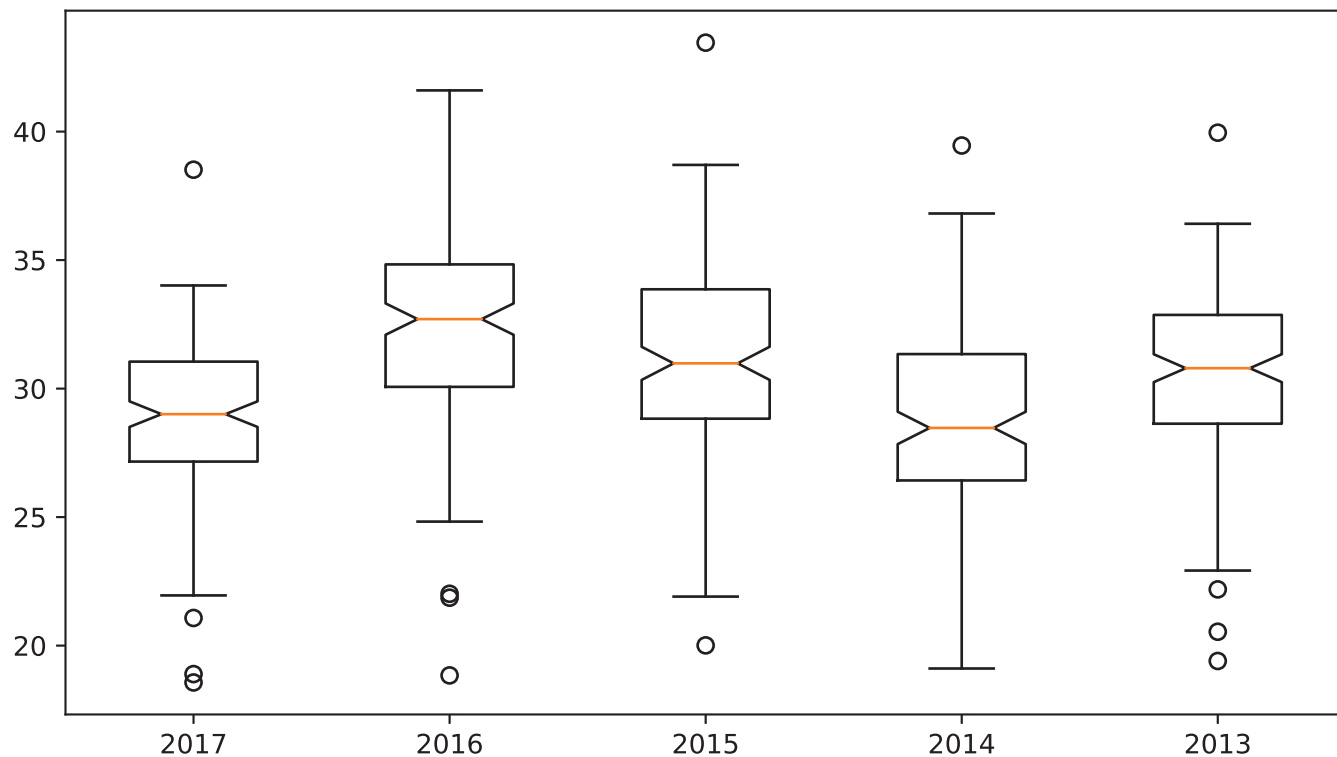
# Análisis Estadístico

## Apéndice 2.1:

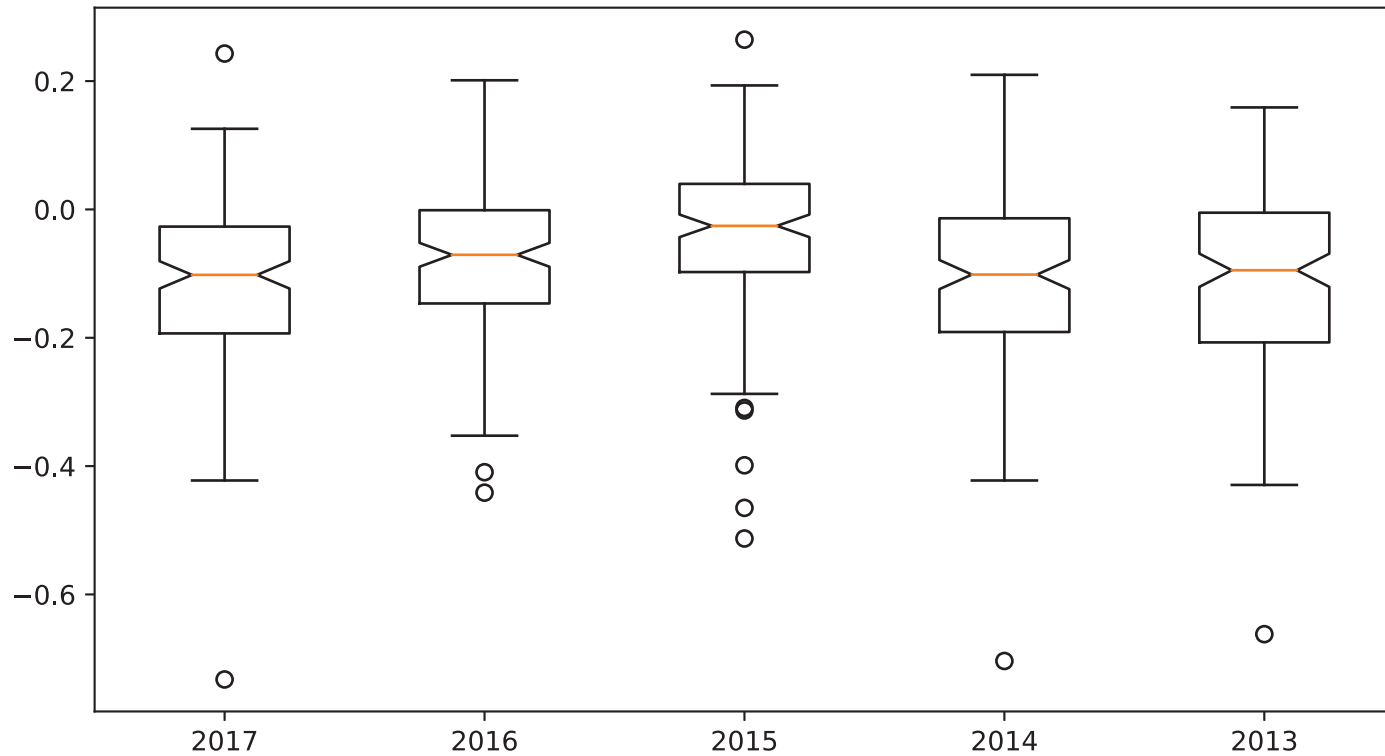
# Diagramas de Cajas



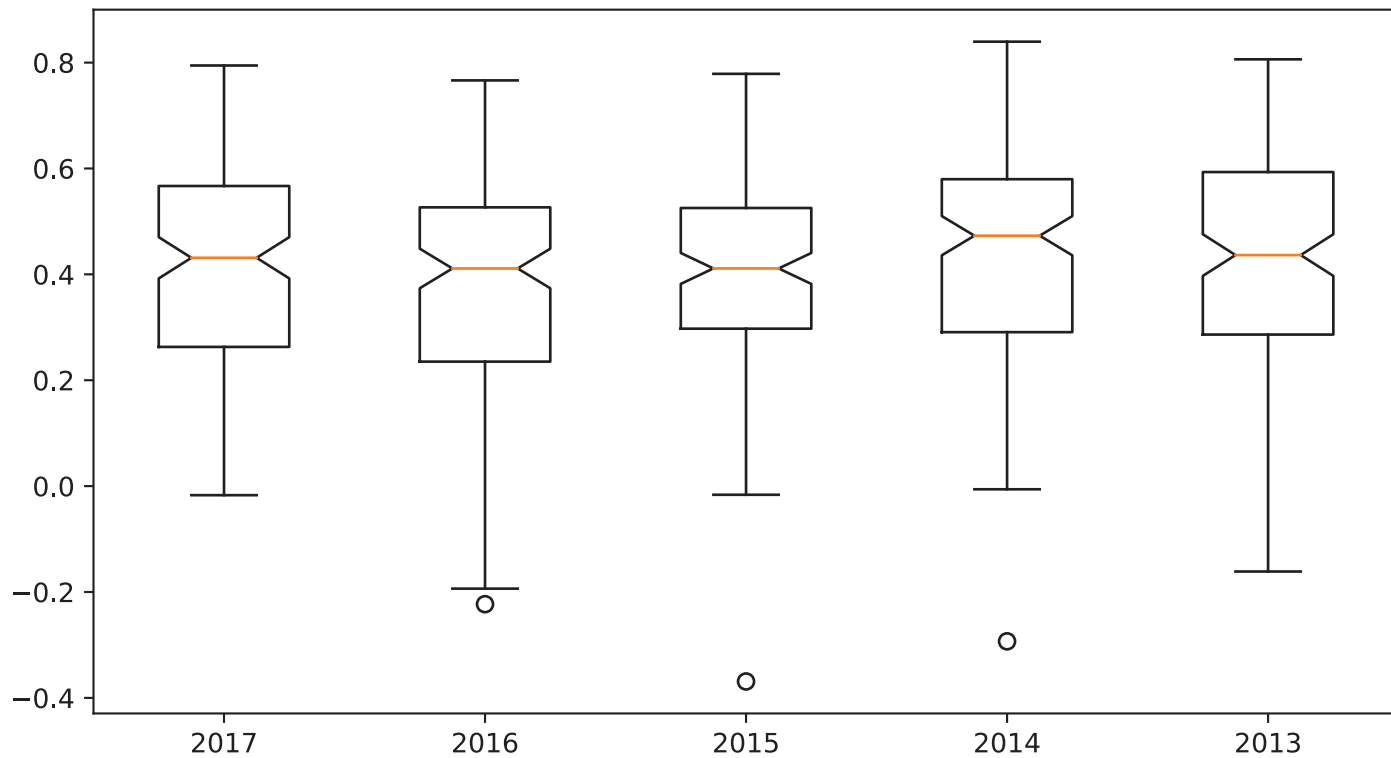
LST [ $^{\circ}\text{C}$ ]



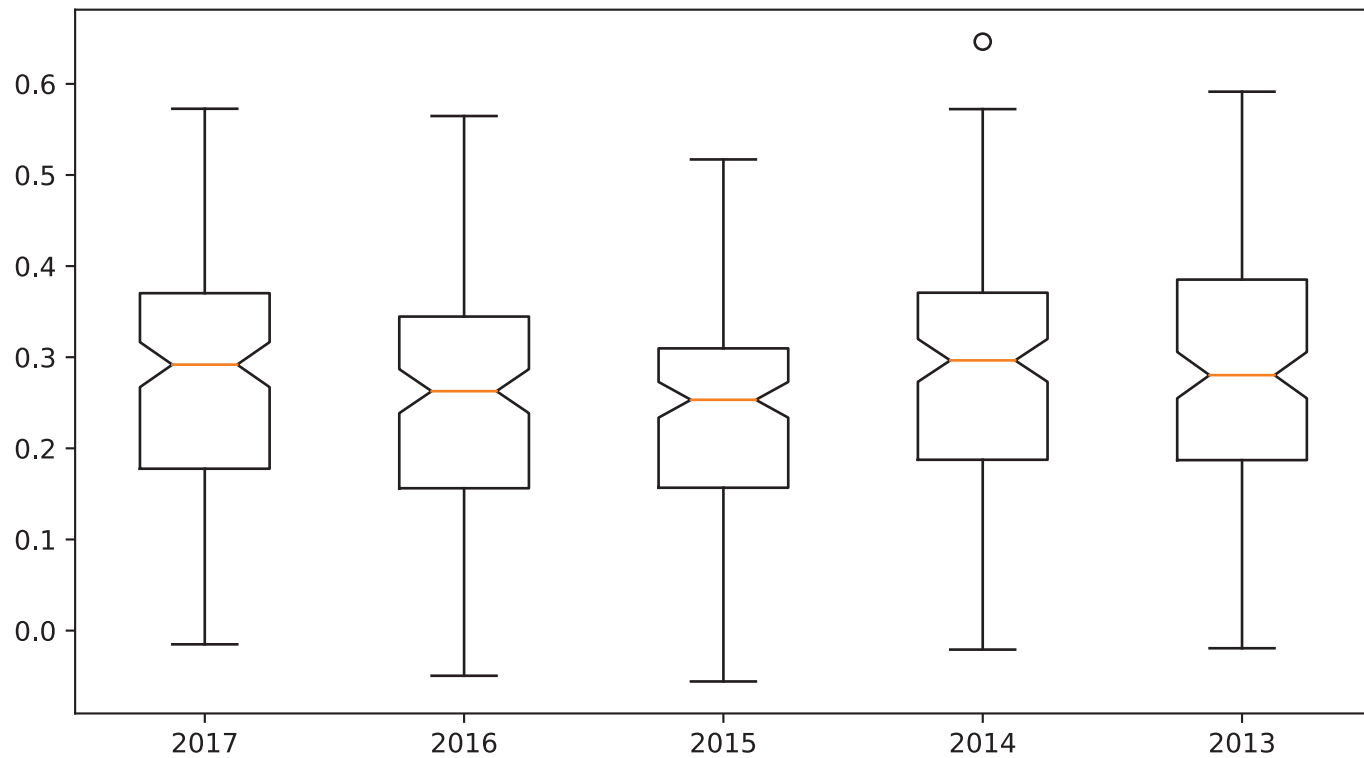
NDBI



NDVI



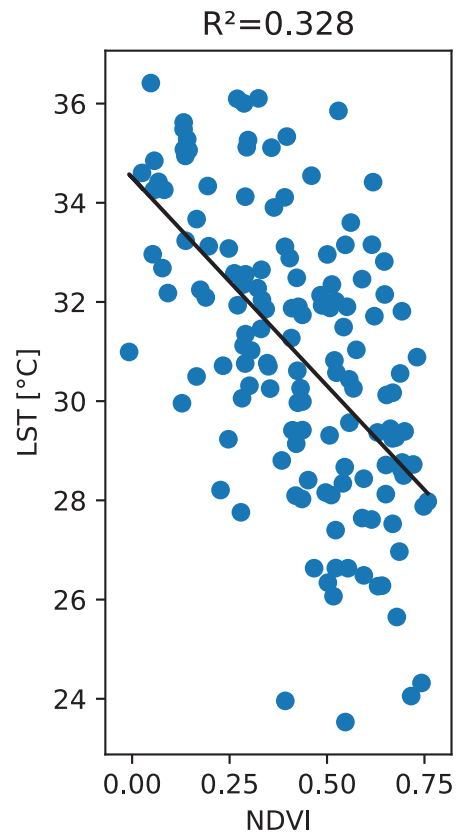
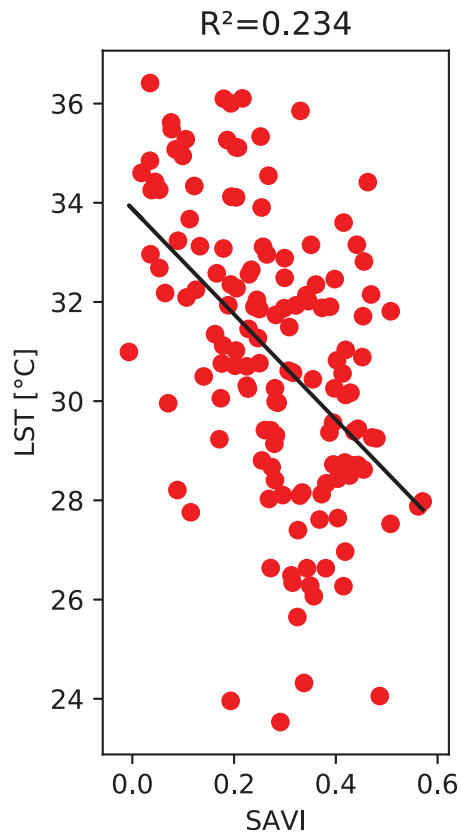
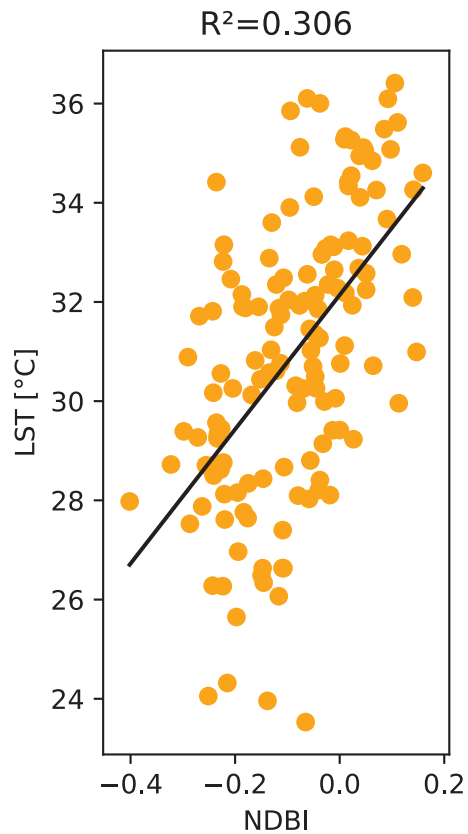
# SAVI



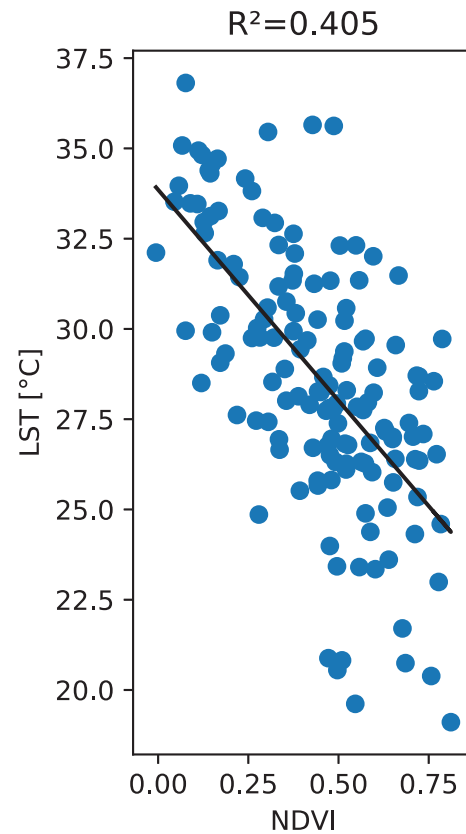
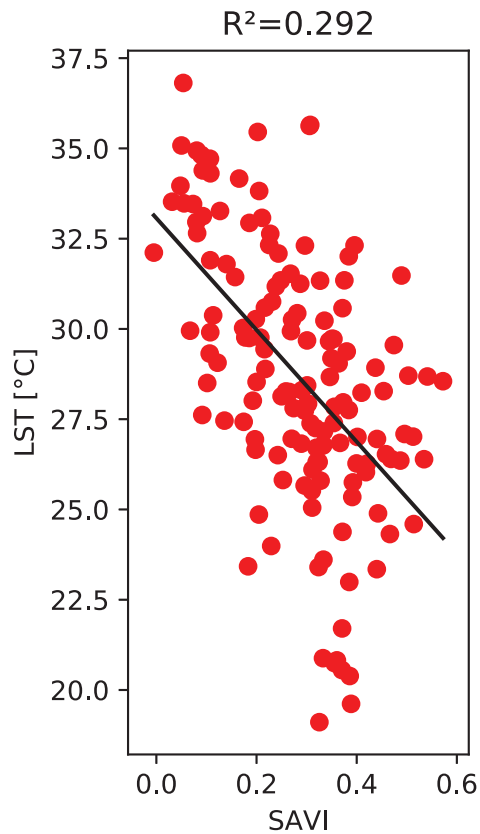
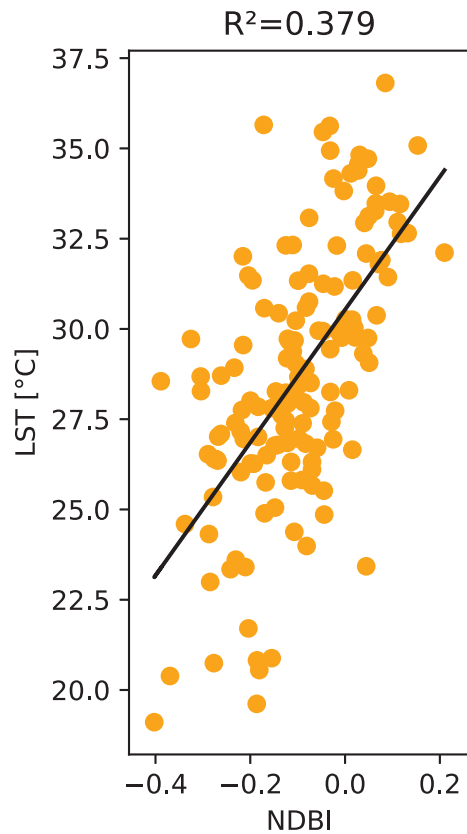


## Apéndice 2.2:

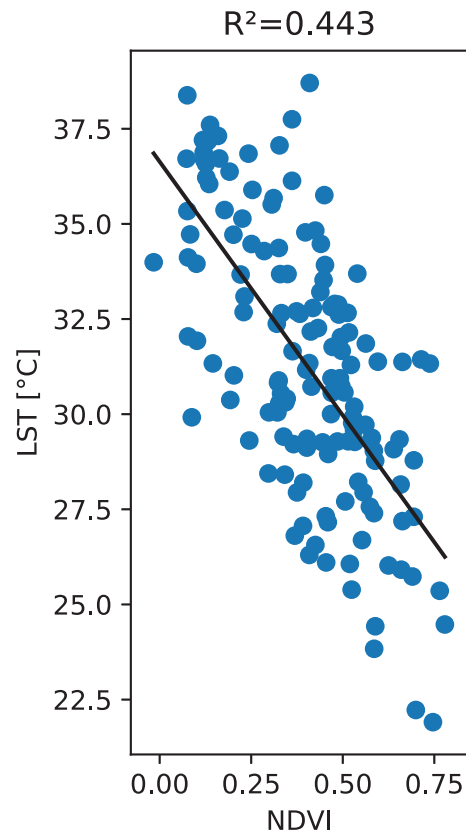
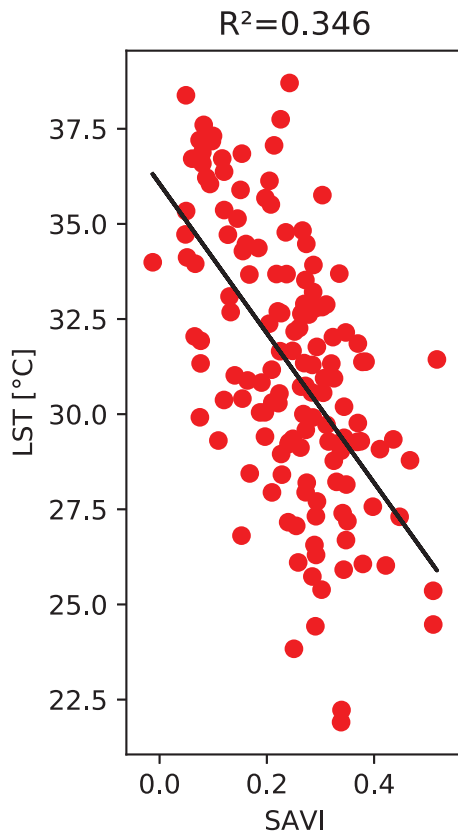
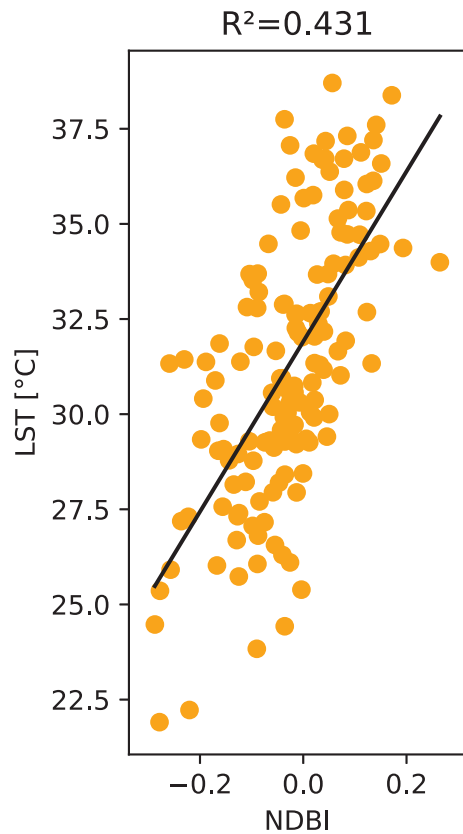
# Diagramas de Dispersión



2014

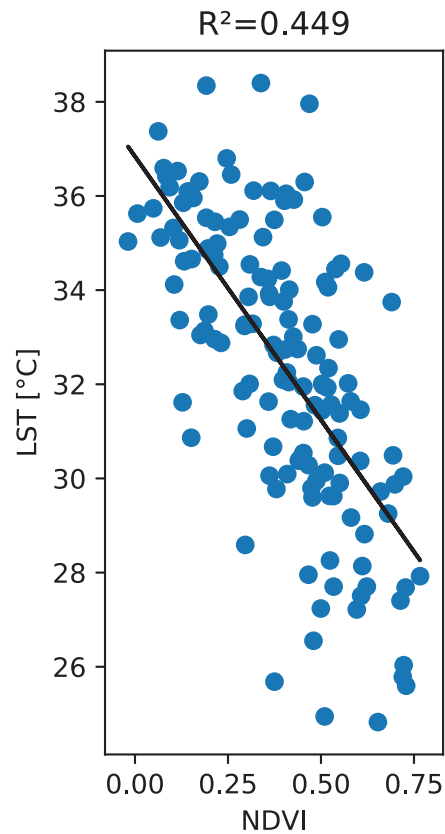
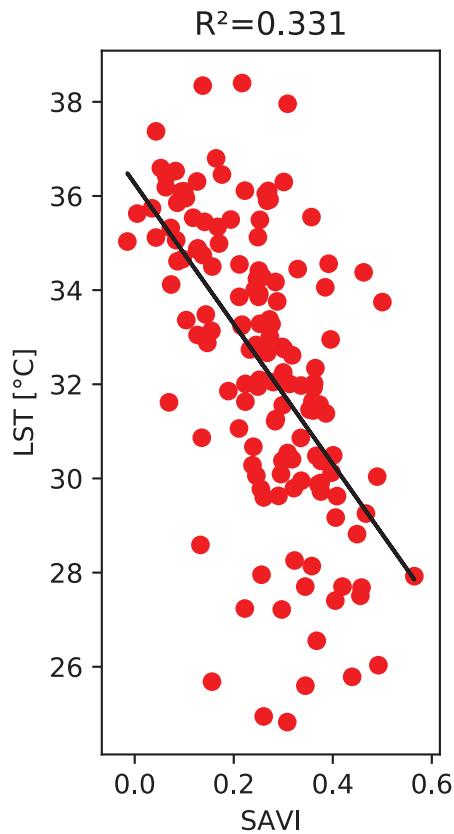
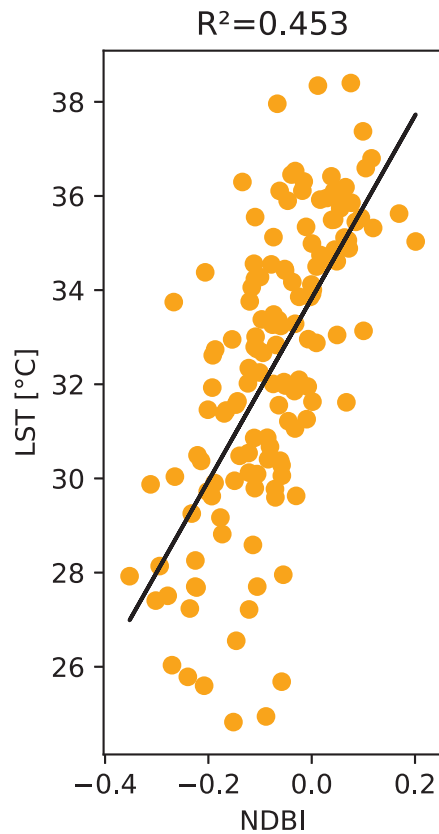


2015

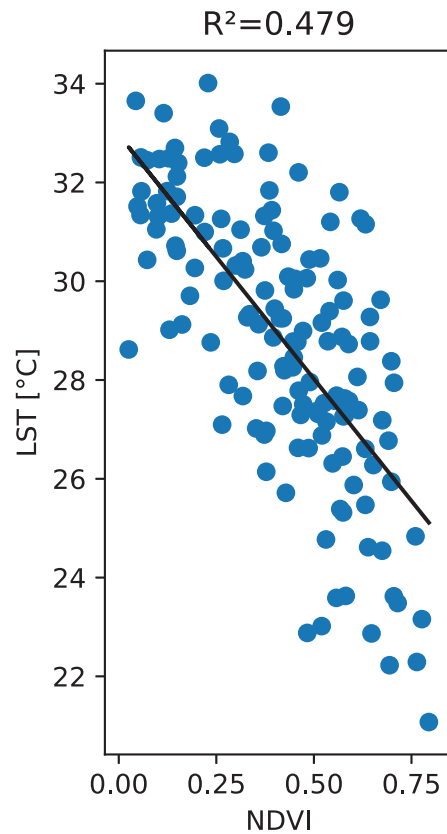
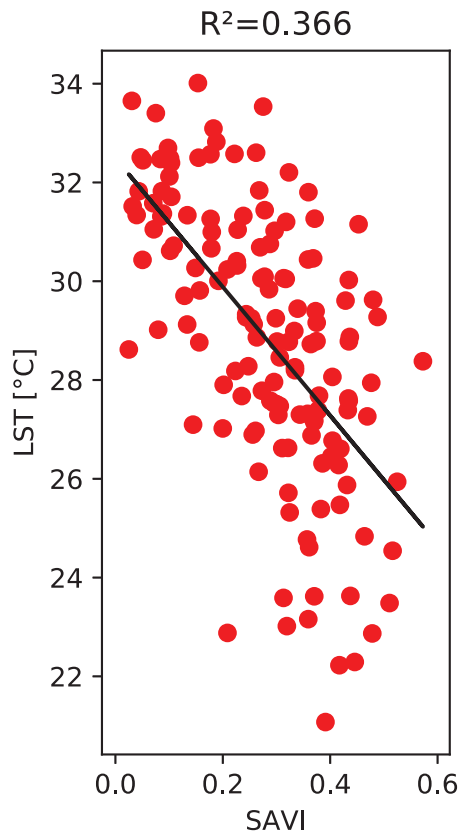
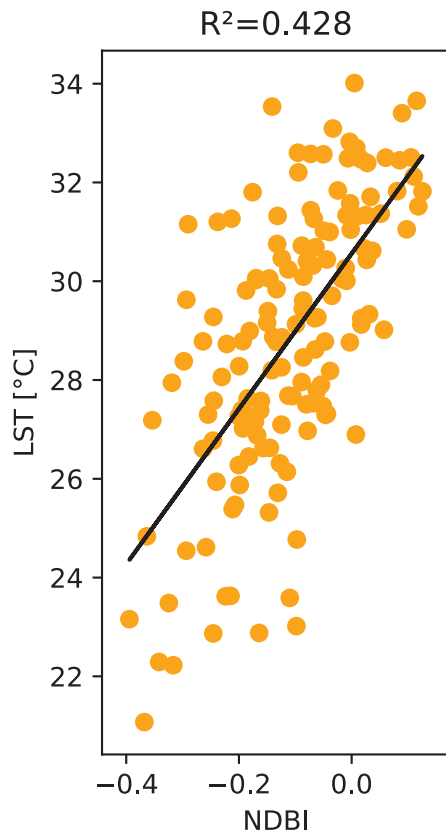




2016



2017



## Apéndice 2.3:

# Tabla de puntos de Validación

ID	COORDENADA X	COORDENADA Y	LST-MODIS (°C)	LST-MODELO (°C)	Δ LST (°C)
1	725227,3678	9677829,79	31,85	32,6288	-0,7788
2	715258,497	9678558,196	32,15	33,5097	-1,3597
3	723534,4491	9677572,111	32,57	33,3964	-0,8264
4	722348,6954	9676877,288	32,79	31,4708	1,3192
5	727391,5152	9681094,391	33,09	34,8888	-1,7988
6	728381,2075	9681618,631	33,29	32,8631	0,4269
7	727788,5396	9681555,131	33,33	35,1115	-1,7815
8	726624,3706	9681470,464	33,53	34,7114	-1,1814
9	717316,1619	9681966,599	33,55	34,6906	-1,1406
10	717184,0184	9681385,797	33,55	32,2113	1,3387
11	718835,0217	9682232,466	33,61	32,4716	1,1384
12	718962,022	9676750,288	33,67	33,6814	-0,0114
13	717729,2681	9676589	33,73	35,3104	-1,5804
14	717205,1851	9680433,295	33,81	32,8495	0,9605
15	715879,6442	9679888,663	33,89	35,4492	-1,5592
16	716549,0171	9679607,794	33,89	33,1967	0,6933
17	716358,5168	9679734,794	33,89	32,1018	1,7882
18	716972,3513	9676983,122	33,91	34,634	-0,724
19	728145,2887	9682486,203	34,01	35,3219	-1,3119
20	719089,0222	9681406,964	34,07	33,1623	0,9077
21	722560,3625	9677745,123	34,09	35,2892	-1,1992
22	717988,3533	9679925,294	34,15	33,252	0,898
23	717141,685	9678718,792	34,17	33,369	0,801
24	716866,5178	9678549,458	34,17	32,9555	1,2145
25	718051,8535	9680560,296	34,19	33,4523	0,7377
26	727576,8725	9682317,132	34,23	33,3586	0,8714
27	726603,2039	9682422,966	34,35	34,3506	-0,0006
28	720718,8588	9681491,631	34,37	32,6944	1,6756
29	717014,6847	9677766,29	34,51	35,9255	-1,4155
30	717861,3531	9677787,457	34,51	35,6636	-1,1536
31	726666,704	9683269,634	34,51	33,651	0,859
32	725820,0357	9683269,634	34,61	33,4676	1,1424
33	721629,0273	9682486,466	34,71	34,1367	0,5733
34	726017,5292	9681521,785	34,73	33,8987	0,8313
35	723703,3648	9683184,967	34,83	36,1321	-1,3021
36	718792,6883	9677766,29	34,95	36,7457	-1,7957
37	719152,5223	9677533,456	34,95	35,8637	-0,9137
38	718633,4151	9678324,834	34,95	33,6974	1,2526
39	719075,9958	9680463,432	35,05	35,9974	-0,9474
40	723788,0316	9679396,127	35,11	36,8755	-1,7655
41	724655,8667	9682317,132	35,17	36,5958	-1,4258
42	718917,0749	9679044,921	35,21	36,3186	-1,1086
43	723957,3653	9682317,132	35,21	34,8137	0,3963
44	718704,6327	9679538,837	35,25	35,3613	-0,1113
45	722560,3625	9681428,131	35,29	35,3831	-0,0931
46	723576,3645	9681406,964	35,35	36,5221	-1,1721
47	724634,7	9681576,298	35,41	34,5418	0,8682
48	720665,7861	9677884,554	35,43	35,4354	-0,0054
49	720062,6908	9680560,296	35,47	35,8469	-0,3769
50	719851,0237	9677872,124	35,49	35,2152	0,2748
51	720845,8591	9680581,462	35,59	36,1467	-0,5567
52	722639,7575	9679538,249	35,63	37,46	-1,83
53	721487,2027	9680408,795	35,73	37,2952	-1,5652
54	720740,0255	9679586,627	35,85	35,0037	0,8463
55	721883,0278	9679819,461	35,89	37,2284	-1,3384
56	721806,5357	9678590,8	35,91	35,7039	0,2061
57	720697,6921	9678803,459	35,95	37,3961	-1,4461
58	719956,8573	9678824,625	35,97	36,3962	-0,4262

RSMD (°C)

1.12